

I Секција: ЕЛЕМЕНТИ НА ПОСТРОЈКИТЕ

СТК 11 - РОТАЦИОНИ МАШИНИ

Стручни известувачи: д-р Милан Чундев, дипл.инж.

д-р Лидија Петковска, дипл.инж.

ИЗВЕШТАЈ НА СТРУЧНИОТ ИЗВЕСТУВАЧ

Р 11-01 КРИВИ НА КОНСТАНТНА ВОЗБУДА НА ХИДРОГЕНЕРАТОРИ И НИВНИ ГРАФИЧКИ ПРЕТСТАВИ, Д. Јанкоски

Во трудот е дадена познатата методологија за добивање на кривите на моќност на синхрони генератори со испакнати полови (хидрогенератори) при константна возбуда. Даден е моделот за добивање на Паскаловиот полжав, а врз основа на векторскиот дијаграм на моќноста кај хидрогенераторите изведени се математичките облици на кривите на моќност при константна возбуда и дадени се некои нивни графички претстави. Врз база на карактеристичните точки на кривите се изведени нивните ограничувања.

Прашања за дискусија:

1. Дали предложената методологија може да се примени директно и на турбогенератори ?
2. Како може да се добие погонската карта на генераторот ?

Р 11-02 ИСПИТУВАЊЕ НА ИЗОЛАЦИЈАТА МЕЃУ НАВИВКИТЕ НА ВОЗБУДНА НАМОТКА НА ТУРБОГЕНЕРАТОР СО ИМПУЛСНИ НАПОНИ, М.Камиловски и Д.Манов

Во трудот е изложена метода за испитување на изолацијата помеѓу навивките на возбудната намотка на турбогенератор со импулсни напони. Изложена е методата на мерење и добивањето на импулсните напони со помош на импулсен генератор. Резултатите се снимаат со дигитален мемориски осцилоскоп така што е можна нивна графичка презентација. За конкретно испитување, во трудот се прикажани резултатите од мерењата и опишани се предностите на предложената метода.

Прашања за дискусија:

1. Кои се предностите на предложената метода во однос на други познати методи за испитување на изолацијата помеѓу навивките на една намотка ?
2. Дали предложената метода е применлива и на други енергетски објекти ?

Р 11-03 ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИТЕ КАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРИТЕ НА СИНХРОН МОТОР СО ИСПАКНАТИ МАСИВНИ ПОЛОВИ НА РОТОРОТ, М.Попниколова Радевска, Е.Бахтовска, М.Чундев, Л.Петковска

Трудот опфаќа нумеричка пресметка на електромагнетните карактеристики и параметрите на синхрон мотор со испакнати масивни полови на роторот, врз база на определување на распределбата на тридимензионалното магнетно поле. Се користи методот на конечни елементи како ефикасен за точно определување на распределбата на магнетното поле во моторот. Презентирано е моделирањето на моторот по методот на конечни елементи како и алгоритмот за точно

определување на основниот магнетен флукс чии резултати се дадени табеларно. Овие резултати се основа за определување на подолжната и попречната реактанса на моторот.

Прашања за дискусија:

1. Кои други карактеристики и параметри на моторот можат да се определат со предложената метода ?
2. Како се врши проверка на точноста на предложената методологија ?

Р 11-04 ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА СТАТОРСКИ РАСПРЕДЕЛЕНИ НАМОТКИ НА ВИСОКОНАПОНСКИТЕ АСИНХРОНИ МОТОРИ, К. Папастеревски

Во овој реферат прикажани се основните релации и прописи за пресметување на димензиите на двослојни распределени намотки на високонапонските асинхронни мотори како и нивната изработка. Даден е начин на избор на пресекот на проводникот, определување на димензиите на зедничката изолација на секциите во каналот и начин на пресметка на факторот на пополнување на каналот. Прикажана е позната постапка за димензионирање на секциите на статорските намотки и опишана е нивната изработка.

Прашања за дискусија:

1. Дали при премотувањето на асинхроните високонапонски мотори може да се постигне подобрување на нивните карактеристики ?
2. Како се врши испитување на премотаните високонапонски асинхронни мотори ?

Р 11-05 МОДЕЛ НА ПОГОН СО АСИНХРОН МОТОР БАЗИРАН НА КАТАЛОШКИ ПОДАТОЦИ, З. Андонов

Во овој труд е даден модел на асинхрон кавезен мотор кој овозможува отпорностите и индуктивностите на моторот да се пресметаат преку каталошки познатите податоци. Во моделот параметрите на моторот се функции зависни од промената на брзината и на струјата. Развиениот модел се користи за определување на параметрите на познат асинхрон мотор, кои потоа се вклучени во динамичкиот модел на моторот. За верификација на предложениот модел и на симулационите резултати при пуштање на моторот со преклопка ѕвезда-триаголник извршени се експериментални мерења на дадениот мотор.

Прашања за дискусија:

1. Дали предложениот модел е општ и дали може да се примени на кој било тип асинхрон мотор ?
2. Со што се потврдува точноста на моделот и колкава е очекуваната грешка?

Р 11-06 ВЕКТОРСКИ СИСТЕМИ И ИДНИ ТРЕНДОВИ ВО РЕГУЛАЦИЈАТА НА АСИНХРОНИТЕ МОТОРИ, Г. Рафајловски

Во трудот е даден ревијален приказ на историскиот развој на регулационите системи со асинхронни мотори: нивниот динамички развој, сегашната состојба и идните трендови во регулацијата на електромоторните погони. Исто така се дискутирани основните карактеристики, перформанси и различните подрачја на

примена на поедините регулациони концепти. Во иднина се очекува се помасовна примена на самоадаптирачките контролни системи, системи на референтно адаптивно управување, експертските системи на управување базирани на фази логиката и невронските мрежи скоро во сите типови на векторски управувани електромоторни погони со асинхрони мотори.

Прашања за дискусија:

1. Кои се предностите, а кои се недостатоците на одредените системи на управување на асинхроните мотори ?
2. Кои се идни трендови во сферата на управување на асинхроните мотори ?

P 11-07 КОМПЕНЗАЦИЈА НА РЕАКТИВНА МОЌНОСТ ВО ЕЛЕКТРОМОТОРНИТЕ ПОГОНИ, С. Мирчевски, З. Андонов

Електромоторните погони се најголеми потрошувачи на реактивна моќност во индустријата. Потребата од реактивна моќност придонесува до полошо искористување на енергетскиот систем, а со тоа и до поскапување на електричната енергија. Во трудот е направена анализа на најзначајните потрошувачи на реактивна енергија. Од анализата на овие потрошувачи се изведени и можностите за подобрување на факторот на моќноста. Анализирани се можностите за подобрување на факторот на моќност без компензирачки уреди и со најчесто користените компензирачки уреди.

Прашања за дискусија:

1. Која од методите за компензација на реактивната моќност е најпогодна за енергетскиот систем во Македонија?
2. Каква е можноста за користење на малите хидроелектрани за компензација на реактивната моќност?

Димитри Јанкоски, дипл.ел.инж.
ЈП Електростопанство на Македонија
Подружница ХЕЦ “Глобочица”, Струга

КРИВИ НА КОНСТАНТНА ВОЗБУДА НА ХИДРОГЕНЕРТОРИ И НИВНИ ГРАФИЧКИ ПРЕТСТАВИ

КРАТКА СОДРЖИНА

Прикажани се математички облици (поларен, алгебарски и параметарски) на кривите на константна возбуда на синхрони генератори со испакнати полови (хидрогенератори) и некои нивни графички претстави. Нивните карактеристични точки се основа за добивање на погонските карти на генераторите.

Клучни зборови: возбуда, криви на константна возбуда, крива на статичка стабилност, ограничувања во погон, погонски дијаграм.

АБСТРАКТ

There is a presentation of mathematical forms (polar, algebraic and parametric) of the curves of constant excitation of synchronous generators with bulging poles (hydrogenerators) and some of their graphic presentations. Their characteristic points are base for making operating maps of generators.

Key words : excitation, curve of constant excitation, curve of state stability, limits of operation, operating diagram (map).

1. УВОД

Основни електрични величини што го карактеризираат погонот на еден синхрон генератор приклучен на мрежа е произведената активна моќност и оддадената или превземената реактивна моќност. На една таква состојба одговара и соодветен возбуден напон како резултат на течењето на возбудна струја низ возбудната намотка. Доколку возбудниот напон се одржува константен тогаш взаемната зависност помеѓу активната и реактивната моќност се од-

вива по т.н. крива на константна возбуда која што има свои карактеристични точки. Ќе прикажеме математички облици на таквите криви и неколку начини на нивни графички претстави.

2. ПАСКАЛОВ ПОЛЖАВ

Зададен е правоаголен координатен систем O,xy и во него кружница со радиус a на растојание a од координатниот почеток, како што е претставено на слика 1. Низ координатниот почеток минува правата

$$y = mx \quad (1)$$

која што ја сече кружницата

$$(x - a)^2 + y^2 = a^2 \quad (2)$$

во точката A . На константно растојание k , од од едната и од другата страна на точката A се наоѓаат точките T_1 и T_2 . Потребно е да го определиме геометриското место на сите точки T за секоја вредност на коефициентот на правецот m .

Ако извршиме замена на (1) во (2) ќе ги добиеме координатите на точката A , односно:

$$x_A = \frac{2a}{1+m^2}, y_A = \frac{2am}{1+m^2} \quad (3)$$

Врз основа на Питагорина теорема понатаму имаме:

$$(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = k^2 \quad (4)$$

Со замена на (3) во (4) и после малку средувања, ќе ја добиеме равенката на множеството на сите точки кои што го задоволуваат условот да бидат на константно растојание k од кружницата за секоја вредност на коефициентот на правецот m :

$$(x^2 - 2ax + y^2)^2 = k^2(x^2 + y^2) \quad (5)$$

Кривите што се добиваат на овој начин, во математиката се познати како конхиди на кружницата или Паскалов полжав.

Ако земеме во предвид дека:

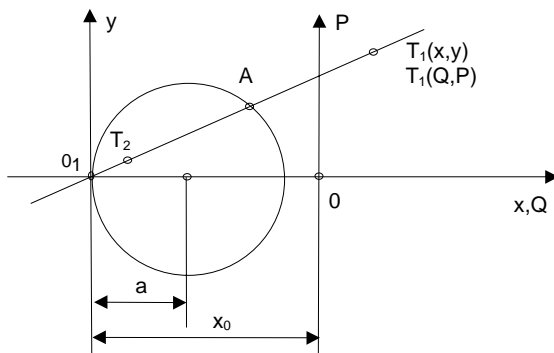
$$\overline{AT_1} = \overline{AT_2} = k = \text{const.},$$

$$\overline{O_1A} = 2a \cos \theta, \overline{O_1T_1} = \rho$$

тогаш со:

$$\rho(\theta) = 2a \cdot \cos \theta + k \quad (6)$$

е зададен поларниот облик на равенката (5). Се разбира дека до истиот резултат ќе дојдеме ако во (5) пре-



Слика 1- Дефинирање на Паскаловиот полжав

миневме во поларни координати со познатата смена:

$$x = \rho \cdot \cos\theta, y = \rho \cdot \sin\theta.$$

Сега ќе извршиме translација на координатниот систем во позитивната насока на x -оската за x_0 , а новите координати нека ги обележеме со Q и P . Во тој случај врската помеѓу старите и новите координати е:

$$x = x_0 + Q, y = P \quad (7)$$

Со замена на (7) во (5) и после средувањето на изразот, ќе се добие:

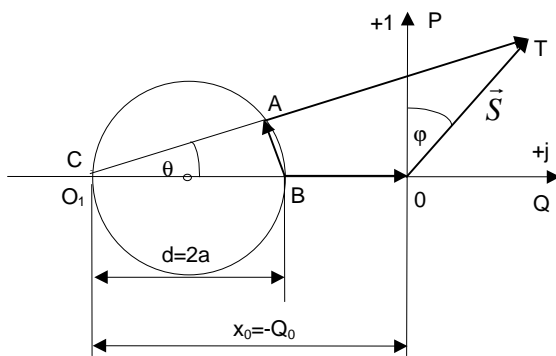
$$[(Q+x_0)^2 + P^2]^2 - [(Q+x_0)^2 + P^2] \cdot [4a(Q+x_0) + k^2] + 4a^2(Q+x_0)^2 = 0 \quad (8)$$

што претставува равенка на кривата (5) во однос на новиот координатен систем.

3. ВЕКТОРСКИ ДИЈАГРАМ НА МОЌНОСТА КАЈ ХИДРОГЕНЕРАТОРИ

Од теоријата на електричните машини е познато дека дијаграмот на слика 2 претставува векторски дијаграм на моќноста на генератор со истакнати полови. Позитивната насока на P оската се поклопува со позитивната насока на реалната оска додека позитивната насока на Q оската се поклопува со позитивната насока на имагинарната оска. Векторот \vec{S} ја претставува привидната моќност на генераторот по фаза, додека аголот што го зафаќа со реалната P оска претставува фазниот агол φ т.е фазниот агол помеѓу струјата низ едната фазна намотка и фазниот напон V . Неговата проекција врз позитивната P оска ја претставува предадената активна моќност на генераторот во мрежата, додека со проекцијата врз Q оската е зададена соодветната реактивна моќност која што во зависност од аголот φ може да биде индуктивна или капацитивна.

На векторскиот дијаграм оправдано се занемарени загубите на бакар во статорската намотка заради фактот што кај големите синхрони машини омската отпорност е помала од вкупната реактанса за околу 20 до 40 пати. Исто така не е земено во предвид заситувањето на магнетното коло кое што особено доаѓа



Слика 2 Векторски дијаграм на моќноста на генератор со истакнати полови

до израз за напони поголеми од номиналниот.

Апсолутните вредности на векторите се зададени со следниве изрази:

$$\overline{BO} = \frac{V^2}{X_d}, \overline{BA} = VI_q \frac{X_d - X_q}{X_d}, \overline{AT} = \frac{EV}{X_d} = k$$

додека пак

$$a = \frac{d}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} V^2 x_0 = \frac{V^2}{X_q} = -Q_0. \quad (9)$$

каде што X_d и X_q се вредностите на подолжната односно попречната

реактанса на генераторот а V е фазниот напон. Заедно со Q_0 за разгледува- ниот генератор тие се константни. Електромоторната сила E што ја индуцира возбудниот флуks заради протекувањето на возбудната струја низ роторската намотка е напонот што се добива на излезот од генераторот кога тој работи во празен бд. Бидејќи E е право пропорционална со возбудната струја, во пона- тамошниот текст ќе ја викаме возбуда.

4. МАТЕМАТИЧКИ ОБЛИЦИ НА КРИВИТЕ НА КОНСТАНТНА ВОЗБУДА И НИВНИ КОНСТРУКЦИИ

Од слика 2 можеме да забележиме дека со промена на аголот θ при константна вредност на k , ходограмот на векторот $\overline{CT} = \bar{\rho}$ се движи по истата крива по која се движеше точката T на слика 1. Но од (9) се гледа дека k е право пропорционално со возбудата E па кривите при различна но константна возбуда, на генераторите со испакнати полови, претставуваат Паскалов полжав. Со замена на (9) во (8) ќе го добиеме конечниот алгебарски израз на за- висноста помеѓу активната и реактивната моќност на генераторот при кон- тантен возбуден напон:

$$\left[P^2 + (Q - Q_0)^2 \right]^2 - \left[P^2 + (Q - Q_0)^2 \right] \cdot \left[\left(\frac{EV}{X_d} \right)^2 + 2V^2 \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} (Q - Q_0) \right] + V^4 \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right)^2 (Q - Q_0)^2 = 0 \quad (10)$$

Горниот израз претставува алгебарска равенка од четврт ред и очигледно е де- ка нејзините криви се симетрични во однос на Q оската. За генераторски режим од интерес е само оној дел од кривите за кој што активната моќност има по- зитивни вредности.

Користејќи ја слика 2 и претходно усвоените ознаки, ќе ја добиеме аголна- та карактеристика $P = P(\theta)$ за активното

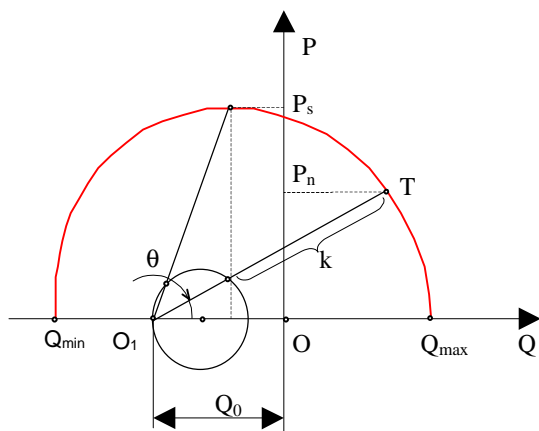
$$P = k \cdot \sin \theta + a \cdot \sin(2\theta) \quad (11)$$

односно за реактивното оптоварување $Q = Q(\theta)$

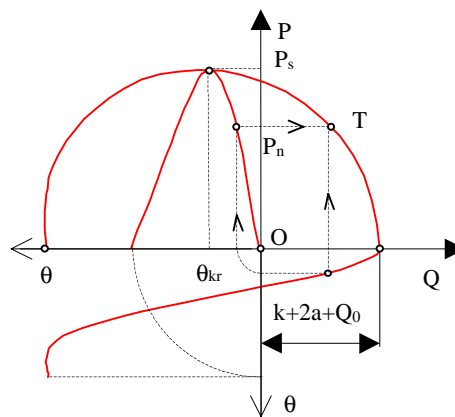
$$Q = k \cdot \cos \theta + d \cdot \cos^2 \theta + Q_0 \quad (12)$$

при $V = \text{const.}$ и $E = \text{const.}$ На овој начин покажавме дека (11) и (12) се параме- тарски равенки на кривата (10) каде што θ се јавува како параметар.

Една графичка конструкција на кривата на константна возбуда произле- гува од самата дефиниција на Паскаловиот полжав и е очигледна од слика 3. За еден генератор со конкретни вредности за a , Q_0 и k , се црта кружница со радиус a и од поларниот почеток O_1 се исцртува полуправа под агол θ во однос на поларната оска. Од пресечната точка на кружницата со полуправата се на- несува отсечка со должина k врз полуправата, при што k соодветствува на но- миналната возбуда E . На тој начин сме определиле една точка од кривата. Оваа постапка се повторува за поголем број на полуправи за различни вредности на аголот θ , ($0 < \theta < 180^\circ$).



Сл.3- Конструкција на кривата со помош помош на поларен дијаграм $p=r(\theta)$



Сл.4-Конструкција на кривата со помош аголните карактеристики $P(\theta)$ и $Q(\theta)$

Со поврзување на точките T се добива кривата за константна (номинална) возбуда. За други вредности на k , односно за други вредности на E , постапката се повторува па ќе се добијат други криви што одговараат на други возбудни напони. Вообичаено е другите вредности на E да се добиваат со множење на номиналната возбуда со некој погоден фактор на пропорционалност, на пр. 0,1; 0,2 и т.н. Потоа на растојание Q_0 од поларниот почеток се нанесува правоаголен координатен систем OPQ со што е овозможено да се следи вистинската зависност помеѓу активната и реактивната моќност.

Друга графичка конструкција е можна ако се искористи параметарскиот облик на кривата кој што беше зададен со (11) и (12). Се исцртуваат аголните карактеристики $p = P(\theta)$ и $q = Q(\theta)$ за одредена вредност на k и се наоѓа пресечната точка T за некој агол θ како што е прикажано на слика 4.

Со избор на повеќе вредности за аголот θ ќе се добијат точките што ја дефинираат кривата на константна возбуда што ја баравме. За друга вредност на k постапката се повторува на сличен начин.

5. КАРАКТЕРИСТИЧНИ ТОЧКИ НА КРИВИТЕ И ПОГОНСКИ ОГРАНИЧУВАЊА

Во однос на правоаголниот координатен систем OPQ може да се воочат неколку карактеристични точки на кривата на константна возбуда.

Точката на максимално индуктивно реактивно оптеретување Q_{max} кое што може генераторот да го произведе е една од карактеристичните точки на кривите на константна возбуда. Таа се добива кога активната моќност е равна на нула т.е. таа е една од нулите на функцијата (10) и изнесува

$$Q_{max} = \frac{EV}{X_d} - \frac{V^2}{X_d} = k + d + Q_0 \quad (13)$$

Другите нули немаат физичко значење. Кога возбудата има номинална вредност тогаш (13) поприма максимална можна вредност.

Друга карактеристична точка на кривата (10) е нејзиниот максимум. Со изнаоѓање на првиот извод на (11) и негово изедначување со нула, може да се покаже дека максимумот на кривата се добива за

$$\cos\theta_{kr} = \frac{\sqrt{k^2 + 8d^2} - k}{4d} \quad (14)$$

каде што k и d се изразите од (9). Оваа е критична вредност на аголот θ затоа што со неговото понатамошно зголемување, односно со зголемување на доведената механичка моќност на осовината на генераторот (вода, пара, гориво и сл.), електричниот противмомент не е во состојба да држи рамнотежа на погонскиот обртен момент и генераторот испаѓа од синхронизам. Со замена на (14) во (11) и (12) ќе ја добиеме точката на статичката стабилност на работата на генераторот при определена возбуда (т.е. k) за активната моќност

$$P_s = \frac{\sqrt{2}\sqrt{k\sqrt{k^2 + 8d^2} + 4d^2 - k^2}(\sqrt{k^2 + 8d^2} + 3k)}{16d} \quad (15)$$

и соодветната реактивна

$$Q_s = \frac{k\sqrt{k^2 + 8d^2} + 4d^2 + 8dQ_0 - k^2}{8d}. \quad (16)$$

Изразите (15) и (16) се параметарски равенки на кривата што ја претставува теоретската граница на статичка стабилност на генераторот, каде што k се јавува како параметар. Во близината на оваа граница всушност генераторот практично не може да работи затоа што и при најмало зголемување на оптоварувањето на генераторот тој ќе испадне од синхронизам. Затоа постои и практична граница на стабилност која се определува на тој начин што вредностите од максималната активна моќност се намалуваат за 10% од номиналната моќност S_n и за тие вредности се изнаоѓаат соодветните точки врз кривите на константна возбуда. На тој начин се обезбедува подобра сигурност во работата на генераторот.

Во текот на стационарниот режим на работа на еден синхрон генератор реално постојат одредени ограничувања кои што го дефинираат неговиот нормален погон.

Едно ограничување веќе спомнавме, а тоа беше границата на статичка стабилност (теоретска односно практична) определена со кривата (15,16). Ова ограничување доаѓа до израз само за нерегулиран односно рачно регулиран режим. За регулиран режим, автоматскиот регулатор на напонот внесува дополнително ограничување (лимитери, заштита од нестанок на возбуда и сл.) со кое што е оневозможено да се изврши недозволено приближување кон кривата на статичка стабилност.

Друго ограничување произлегува од максималната вредност на возбудната струја за која што е димензионирана роторската намотка. Таа вредност генераторот ја прима при номинална возбуда односно при номинално оптоварување. Но покрај максималната (номинална) вредност на возбудата постои и минимална вредност на возбудата што е лимитирана од техничките можности на рачниот регулатор. За истосмерните генератори со самовозбудување, кои што служат

како извори за возбуда струја, тоа е минималниот напон при кој што е возможно да отпочне самовозбудувањето којшто обично изнесува околу 10 до 20% од номиналната возбуда. Што значи кривите на константна возбуда за $E=E_n$ и $E=0,2E_n$ ограничуваат дел од погонскиот режим.

Статорската намотка и системот за ладење се димензионирани за номинална струја на оптеретување. За поголеми струи доаѓа до недоволени прегревања на намотката. Ако претпоставиме дека фазниот напон на клемите од генераторот е ист со номиналниот фазен напон тогаш границата на прегревањето на статорската намотка е определена со кружницата

$$P^2 + Q^2 = S_n^2 \quad (17)$$

каде што $S_n = V_n I_n$ е радиусот на кружницата.

Ограничување постои и заради ограничената механичка моќност што ја предава турбината врз генераторот. Таа се избира така што при нејзина максимална моќност, активната моќност на една фаза на генераторот да биде номинална, односно

$$P_n = V_n I_n \cdot \cos \varphi_n = S_n \cdot \cos \varphi_n \quad (18)$$

Доколку е предвиден и технички минимум на работа на генераторот, тогаш со

$$P = P_{\min} \quad (19)$$

е зададено последното ограничување на работниот режим на генераторот.

Ако ги претставиме сите ограничувања што ги спомнавме со нивните дијаграми во заеднички P, Q координатен систем, тогаш ќе ја добиеме т.н погонска карта на генераторот која што ја дефинира областа на движење на врвот на векторот \vec{s} во стационарен режим на работа на генераторот, слика 5.

6. ПРЕМИН ВО РЕЛАТИВНИ ЕДИНИЦИ. ПРИМЕР НА КРИВИ НА КОНСТАНТНА ВОЗБУДА

Често пати многу електрични големини (напон, струја, моќност и др.) во теоријата и во праксата се изразуваат преку нивните релативни единици. Всушност релативните единици претставуваат однос помеѓу самата големина и некоја базна големина. Во електроенергетиката обично за базна големина се зема нејзината номинална вредност. Релативните единици се бездимензионални и по вредност се блиски до единица. Од таа причина се многу погодни за компјутерска обработка и приказ. Во нашиов случај ќе имаме:

$$E^* = \frac{E}{V_n}, V^* = \frac{V}{V_n}, P^* = \frac{P}{S_n}, Q^* = \frac{Q}{S_n}, X_n = \frac{V_n}{I_n}, X_d^* = \frac{X_d}{X_n}, X_q^* = \frac{X_q}{X_n} \quad (20)$$

Во горните изрази I_n е номиналната струја што минува низ фазната намотка додека со V_n е зададен номиналниот фазен напон на мрежата. Бидејќи изразите (11) и (12) се однесуваат за една фаза, при премин во релативни еди-

ниции тие треба да се поделат со $S_n = V_n I_n$. Користејќи ги (20), тогаш (11) и (12) ќе постанат:

$$P^* = k^* \cdot \sin \theta + a^* \cdot \sin(2\theta) \quad (21)$$

односно

$$Q^* = k^* \cdot \cos \theta + d^* \cdot \cos^2 \theta + Q_0 \quad (22)$$

каде што k^* и a^* формално ги имаат истите облици како во (9) но големините ги имаат нивните релативни вредности. Од последниве два изрази произлегува дека изразите (13)-(17) формално важат и за случај кога се работи со релативни единици. Од тие причини, во понатамошниот текст, кога ќе се повикуваме на P односно Q , секогаш ќе работиме во релативни единици па ознаката $*$ нема да ја пишуваме заради упростување на самиот текст.

Во табелата 1 се дадени податоци, во релативни единици, за генераторите од некои хидроелектрани од електроенергетскиот систем на Македонија. Ако за базни големини ги земеме номиналниот напон и номиналната моќност, врз основа на (9) ќе ги добиеме податоците во релативни единици што се дадени во табела 1.

Табела 1- Основни податоци за конструкција на кривите на константна возбуда

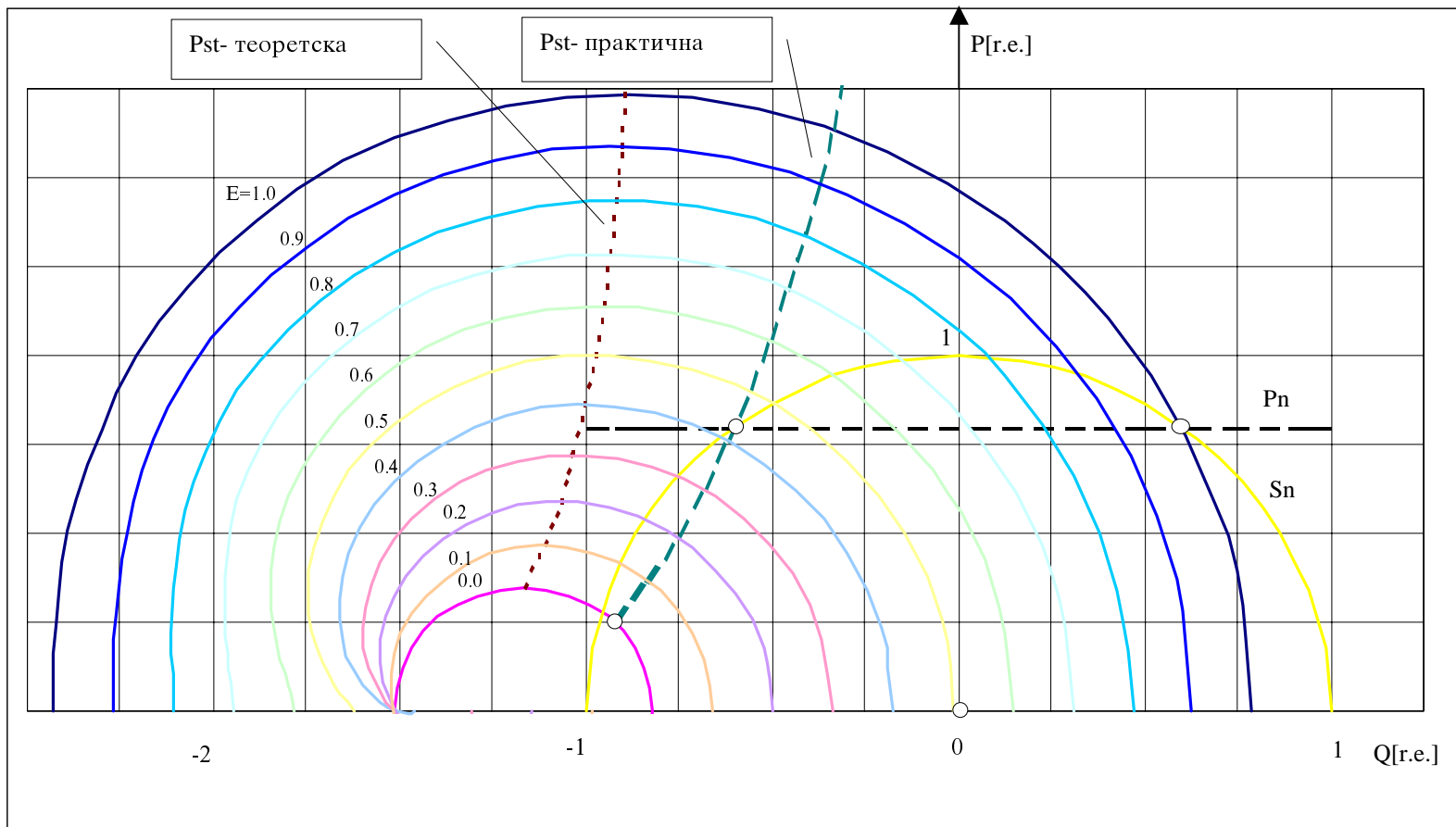
| Хидро-електрана | Генератор | $\cos \phi_n$ | X_d [r.e.] | X_q [r.e.] | a [r.e.] | k [r.e.] | Q_0 [r.e.] |
|-----------------|-----------|---------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|
| Глобочица | A,B | 0,8 | 1,22 | 0,66 | 0,348 | 1,611 | -1,515 |
| Шпилје | A,B,C | 0,9 | 1,175 | 0,828 | 0,178 | 1,561 | -1,208 |
| Вруток | A,B | 0,9 | 1,39 | 0,95 | 0,167 | 1,454 | -1,053 |
| “ | C,D | 0,9 | 1,30 | 0,72 | 0,31 | 1,479 | -1,389 |
| Врбен | A,B | 0,8 | 1,54 | 0,75 | 0,342 | 1,46 | -1,333 |

Со помош на податоците од табелата 1, користејќи ги математичките изрази што ги изнесовме, може на графички начин или со помош на персонален компјутер да се прикажат не само кривите на константна возбуда туку и погонските карти на синхроните генератори со истакнати полови.

На слика 5 се прикажани кривите на константна возбуда со ограничувањата во погонот за генераторите во ХЕЦ Глобочица. Од сликата може да се забележи дека за овие генератори, теоретската крива на статичка стабилност воопшто не го сече просторот зафатен со кругот со радиус S_n , но практичната крива го сече во еден негов дел. За некои генератори ова засекување може да биде уште позначајно (за големи вредности на X_q) но и скоро безначајно или да не го сече (за многу мали вредности на X_q).

7. ЗАКЛУЧОК

Кривите на константна возбуда ја прикажуваат взаемната зависност помеѓу активната и реактивната енергија на синхронитот генератор кога возбудата се одржува константна за нејзини различни вредности. Со нивна помош може да



Слика 5- Криви на константна возбуда на синхроните генератори во ХЕЦ “Глобочица” со погонските ограничувања за $\cos\phi_n=0.8$, $X_d=1.32$ [r.e.] и $X_q=0.66$ [r.e.]

се добијат и кривите на статичка стабилност (теоретска и практична) на работата на генераторот.

Врз основа на избраниот математички облик на кривите (поларен, алгебарски или параметарски) прикажувањето на нивните дијаграми може да биде чисто геометриско или со помош на погоден програм (MathCAD, EXCEL) на персонален компјутер.

Тие се основа за добивање на т.н. погонски карти на генераторите кога се земат предвид и другите ограничувања што произлегуваат од погонот. Поседувањето на таквите дијаграми од страна на погонската екипа од електраната е корисно затоа што тие се еден вид водич за прикажување на активниот и реактивниот излез на генераторот за повеќе експлоатациони услови.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] V. Devidé: Riješeni zadaci iz više matematike 2, Školska knjiga, Zagreb, 1973
- [2] H. Požar: Snaga i energija II, Informator, Zagreb, 1985
- [3] H. Požar: Osnovi energetike II, Školska knjiga, Zagreb, 1976
- [4] O. Hora a kolektiv: Regulační a budicí systémy synhronních strojů, SNTL, Praha, 1985
- [5] А.И. Волудек: Электические машинw , Энергич, Ленинград, 1978
- [6] B.Mitraković: Sinrone mašine, Naučna knjiga, Beograd, 1977

МАКЕДОНСКИ КОМИТЕТ ЗА ГОЛЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМИ - СИГРЕ СКОПЈЕ
ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО СИГРЕ

Проф.д-р Методија Камиловски
Електротехнички факултет, Скопје

Проф.м-р Дионис Манов
Електротехнички факултет, Скопје

**ИСПИТУВАЊЕ НА ИЗОЛАЦИЈАТА МЕЃУ НАВИВКИТЕ НА ВОЗБУДНА
НАМОТКА НА ТУРБОГЕНЕРАТОР СО ИМПУЛСНИ НАПОНИ**

СОДРЖИНА

Во трудов е изложен метод за испитување на изолацијата меѓу навивките на возбудната намотка на турбогенератор со импулсни напони, добиени со помош на импулсен генератор и снимени со дигитален мемориски осцилоскоп. Прикажани се резултатите од конкретно испитување и опишани се предностите на овој метод.

**TURN TO TURN INSULATION TESTS OF A TURBOGENERATOR
EXCITATION WINDING WITH IMPULSE VOLTAGES**

ABSTRACT

This paper presents a method of turn to turn insulation tests of a turbogenerator excitation winding with impulse voltages. Impulse voltages are produced by a impulse generator and they are recorded using digital storage oscilloscope. Some practical test records are presented, as well as the advantage of this mehod is described.

КЛУЧНИ ЗБОРОВИ: Турбогенератор, возбудна намотка, изолација меѓу навивки, импулсни испитувања, дигитален мемориски осцилоскоп.

KEY WORDS: Turbogenerator, excitation winding, turn to turn insulation, impulse tests, digital storage oscilloscope.

1. ВОВЕД

Со програмата за следење и утврдување на погонската состојба на турбогенераторите за време на планираните прегледи и ремонти се опфатени и испитувањата на изолационите системи на статорската и роторската - возбудна намотка.

Исправната погонска состојба на роторот а особено на изолациониот систем на возбудната намотка е од големо значење за доверливата работа на синхрониот генератор.

Високите номинални напони и современите тиристорски возбудни системи, коишто се применуваат при турбогенераторите за големи моќности, како и изразените: електрични, термички и механички напрегања во текот на експлоатацијата, врз изолациониот систем на возбудната намотка, поставуваат големи барања.

Иако современите изолациони материјали многу добро поднесуваат: електрични, термички и механички напрегања, во текот на експлоатацијата на синхрониот генератор може да се случат оштетувања на изолацијата на возбудната намотка спрема телото или меѓу навивките. Првото оштетување се регистрира како земенспој. Со ова оштетување може да продолжи генераторот да работи се до наредниот планиран ремонт, ако во меѓувреме не се случи уште едно такво оштетување и поради тоа генераторот биде исклучен од погон. Вториот вид на оштетување не се сигнализира туку во зависност од големината на оштетувањето може да се манифестира со: промена на возбудниот магнетен напон, зголемено локално загревање на местото на оштетувањето, како и со зголемени вибрации ("термички дебаланс"), поради што може да се исклучи генераторот од работа.

Најчесто оштетувањата на изолацијата меѓу навивките настануваат во челните врски на возбудната намотка, што се наоѓаат под заштитните капи.

Во секој случај и двата вида на оштетувања на изолациониот систем на возбудната намотка не се пожелни и ја намалуваат доверливата работа и времето на погонската искористеност на синхрониот генератор.

Од овие причини за утврдување на состојбата на изолациониот систем на возбудната намотка, а особено на изолацијата меѓу навивките, се посветува особено внимание и се вршат различни испитувања.

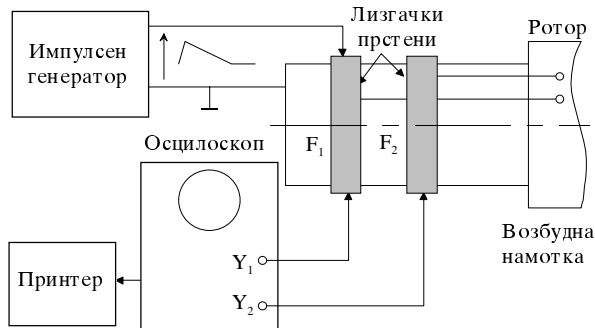
За следење на состојбата на изолациониот систем на возбудната намотка, за време на планираните прегледи и ремонти, се препорачуваат и вообичаено се вршат следниве испитувања и мерења: мерење на омскиот отпор, мерење на отпорот на изолацијата и импедансата на возбудната намотка при различни вредности на струјата. Мерењата може да се вршат при мирување на роторот во монтажна или демонтажна состојба и при вртење на роторот на синхрониот генератор.

Испитувањето на состојбата на изолацијата меѓу навивките на возбудната намотка со мерење на импедансата на намотката, често пати не дава задоволителни резултати. Со ова испитување може да се открие грешка во изолацијата меѓу навивките, доколку со оштетувањето се опфатени поголем број на навивки. Познато е од практиката дека импедансата на возбудната намотка и при исправна изолација меѓу навивките зависи од брзината на вртење на роторот, како и од големината на струјата со кое се врши мерењето. Овој метод не е доверлив и не дава задоволителни резултати ако оштетувањето на изолацијата меѓу навивките е опфатено со мал број на навивки, а исто така не може да се лоцира местото на оштетување.

Во овој реферат е изложен современ метод за утврдување на состојбата на изолацијата меѓу навивките на возбудната намотка, со импулсни напони доведени од импулсен генератор а мерени и осцилографирани со дигитален мемориски осцилоскоп, како дополнување на класичните методи, а се со цел за поточна проценка на состојбата на изолациониот систем.

2. МЕТОД НА МЕРЕЊЕ

Испитувањето на изолацијата меѓу навивките на возбудната намотка на турбогенераторот, денес често се остварува со мерење на одзивот од импулсен напон приклучен меѓу еден од лизгачките прстени и телото на роторот.



Сл.1 Шема на мерење на изолацијата со импулсен напон

На Сл.1 е дадена шемата за изведување ова испитување. Сигналот од импулсниот генератор се приклучува меѓу телото на роторот и еден од лизгачките прстени F_1 и F_2 на возбудната намотка. Двоканалниот дигитален осцилоскоп со помош на две сонди е приклучен на двата лизгачки прстени. Од импулсниот генератор се добиваат импулсни напони со амплитуда од околу 100V, време на пораст од 1.2 μ s и време на пад од 100 μ s. Фреквенцијата на импулсните напони е 50Hz.

При ова мерење возбудната намотка поставена во каналите на роторот заедно со придушната намотка, претставува брановод со соодветна бранова имеданса. Влезот на овој брановод е меѓу првиот лизгачки прстен F_1 и телото на роторот, а излезот е меѓу вториот лизгачки прстен и телото на роторот. Со осцилоскоп се мерат облиците на влезниот и излезниот напонски импулс од брановодот. Добиените осцилограми се запишуваат со соодветен пишувач.

Определувањето на состојбата на изолацијата меѓу навивките на возбудната намотка и откривањето на евентуално присутна куса врска меѓу навивките, се врши со визуелна споредба на осцилограмите на напоните кои се снимени со осцилокопот и пишувачот.

Предноста на овој метод е во неговата практична примена и во едноставното толкување на добиените резултати. Тој може да се применува во монтирана и демонтирана состојба на роторот како и при вртење и мирување на роторот. За разлика од методите споменати во воведот, кои претставуваат класични методи предвидени со меѓународни прописи за дијагностицирање на состојбата, односно за определување на куса врска меѓу навивките на возбудната намотка на турбогенераторот, овој метод е современ и се почесто се користи за оваа цел како од страна на производителите, така и од страна на корисниците на синхроните генератори.

3. АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Со импулсен метод е испитувана изолацијата меѓу навивките на возбудната намотка на турбогенераторот во ТЕ "Осломеј" - Кичево. Добиените резултати се прикажани во Прилог.

На осцилограмот 1 е прикажан обликот на импулсниот напон од импулсниот генератор во празен од.

На осцилограмот 2 е прикажан обликот на влезниот и излезниот импулсен напон од возбудната намотка на турбогенераторот. При тоа како влез се користи лизгачкиот прстен F_1 .

На осцилограмот 3 е прикажан обликот на излезниот и влезниот импулсен напон од возбудната намотка на турбогенераторот кога како влез се користи лизгачкиот прстен F_2 .

На осцилограмот 4 е прикажан истиот осцилограм како и осцилограмот 3 само со помало временско мерило.

На осцилограмот 5 е прикажан обликот на влезниот импулсен напон на лизгачкиот прстен F_2 , кага лизгачкиот прстен F_1 е краткоспоен со телото на роторот.

На осцилограмот 6 се прикажани брановите облици на возбудата прво доведена на лизгачкиот прстен F_1 , а потоа доведена на лизгачкиот прстен F_2 , при отворен вод.

Од овие осцилограми се гледа дека нема разлика во брановата импеданса на возбудната намотка на турбогенераторот мерена од двете страни. Тоа укажува дека нема присутна куса врска меѓу навивките на возбудната намотка. Евентуално куса врска може да има на средина од намотката, кога се добиваат исти облици на брановите, што е неочекувано да се случи.

Врз основа на анализата на резултатите од испитувањата и мерењата може да се заклучи дека возбудната намотка е во исправна погонска состојба што се однесува на нејзините електрични карактеристики.

За целосно утврдување на погонската состојба на роторот на турбогенераторот, потребно е да се изврши и испитување на заштитните капи со ултразвучна и пенетранска дефектоскопија, како и проверка на состојбата на другите машински делови, вентилационите канали, каналските клинови и друго.

4. ЗАКЛУЧОК

Испитувањето на изолацијата меѓу навивките на возбудната намотка на турбогенераторот со методот на импулсни напони, ги проширува сознанијата за состојбата на самата изолација. Добра страна на овој метод е што тој не е деструктивен. Тој овозможува детекција на ослабена изолација уште при нејзиното појавување како последица од лошата изработка, поради механички напрегања при работата и поради стареење на истата.

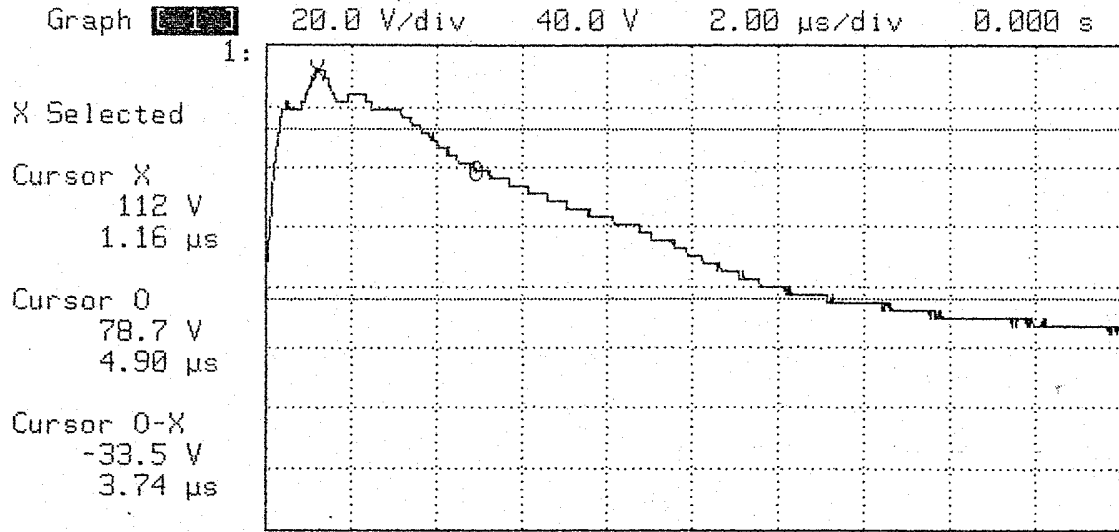
Овој метод може да се применува кога роторот е монтиран или демонтиран и кога роторот мирува или се врти.

Нашите искуства укажуваат дека треба да се користи поголема амплитуда на импулсниот напон за испитување ако се сака да се детектираат ослабените места во изолацијата. За вакви испитувања се произведуваат посебени уреди за импулсно испитување на изолацијата меѓу навивките со напон од неколку kV [2, 3].

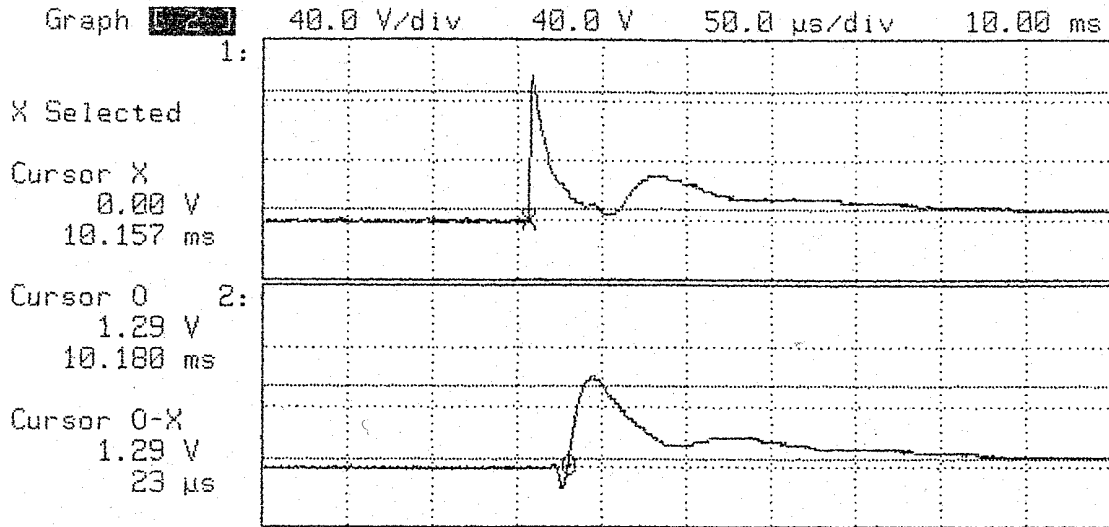
5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Busti T. Pra}enje stanje me|uzavojne izolacije namota rotora turbogeneratora, XIX Savetovanje elektroenergeti~ara Jugoslavije, Bled, 1989, 151-158.
- [2] Srb N. Primjena Baker ure|aja za ispitivawe izolacije namota, Kon~ar-Institut za elektrotehniku.
- [3] "Winding test instruments ST203E" Baker Instrument GmbH, Germany.

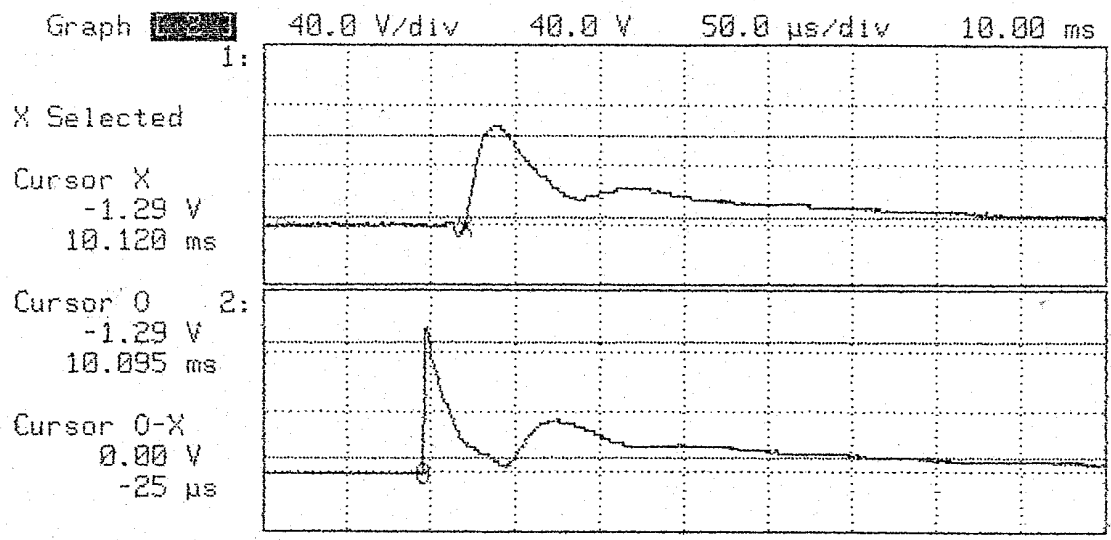
Прилог:



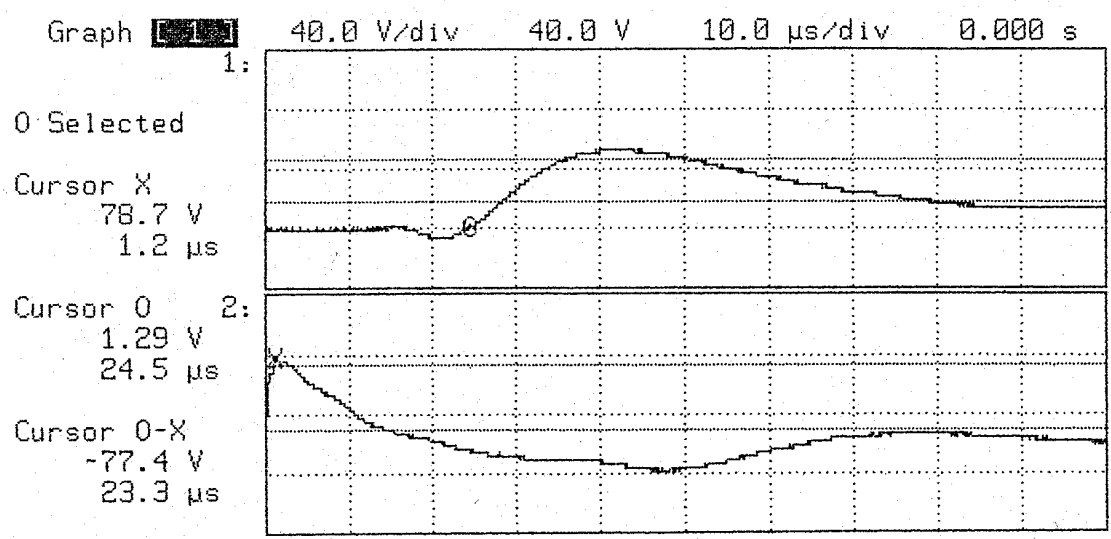
Осц.1 Облик на импулсен напон во празен од



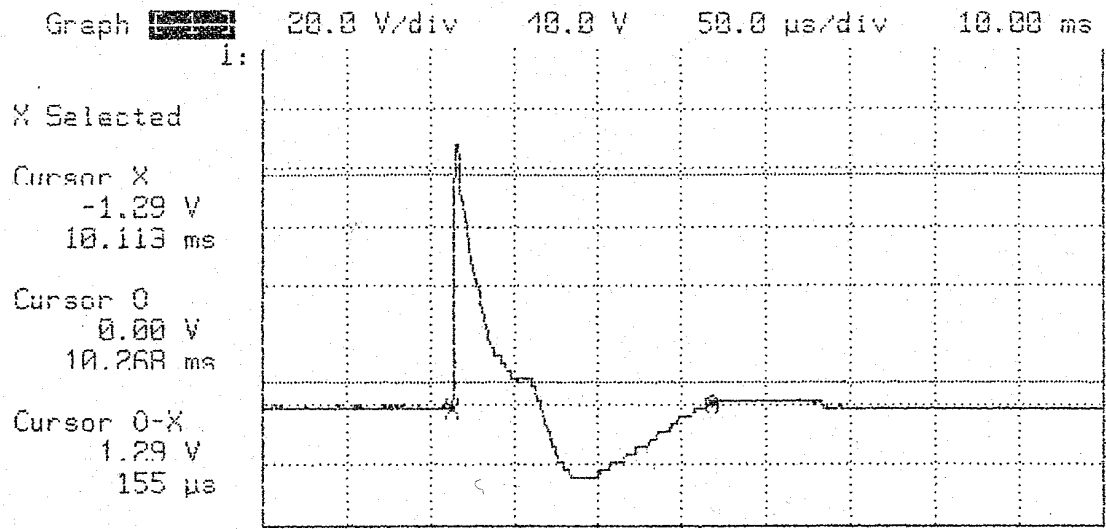
Осц.2 Возбуден импулсен напон на прстенот F_1 и одзив на прстенот F_2 при отворен вод



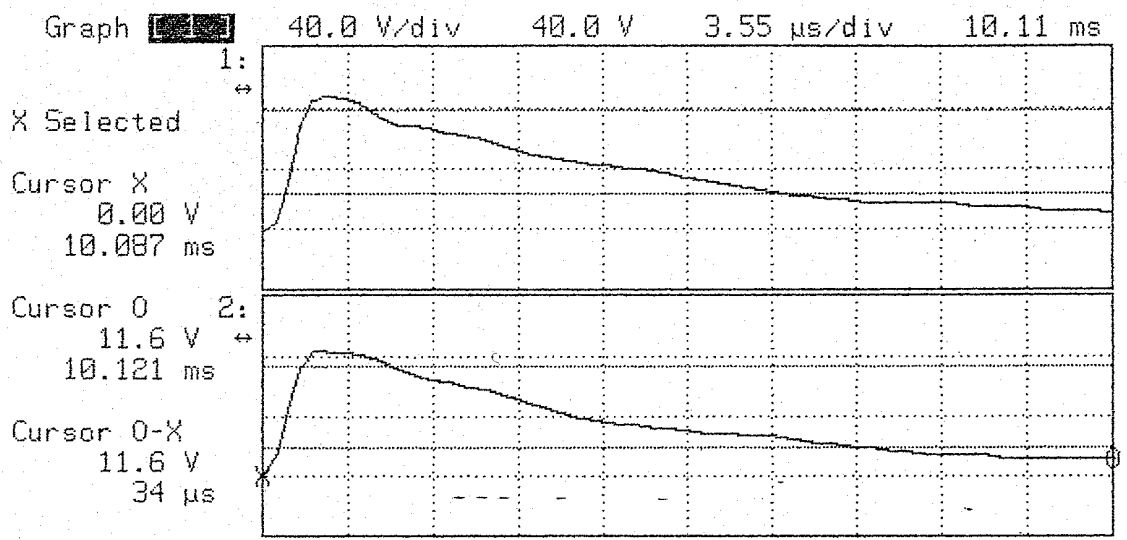
Осц.3 Возбужден импульсен напон на прстенот F_2 и одзив на прстенот F_1 при отворен вод



Осц.4 Возбужден импульсен напон на прстенот F_2 и одзив на прстенот F_1 при отворен вод



Осц.5 Возбужден импульсен напон на прстенот F_2 при кусосвръзан прстен F_1



Осц.6 Возбужден импульсен напон на прстенот F_1 и возбужден импульсен напон на прстенот F_2 , при отворен вод

МАКЕДОНСКИ КОМИТЕТ ЗА ГОЛЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМИ-СИГРЕ
СКОПЈЕ,

ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО СИГРЕ

Др. Мирка Попниколова Радевска
Др. Елизабета Бахтовска
ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ, Битола
Др. Милан Чундев
Др. Лидија Петковска
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ, Скопје

ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИТЕ КАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРИТЕ НА СИНХРОН МОТОР СО ИСПАКНАТИ МАСИВНИ ПОЛОВИ НА РОТОРОТ

Содржина

Трудот опфаќа нумеричка пресметка на електромагнетните карактеристики на Синхрон Мотор со Испакнати Масивни Полови во роторот (СМИМП), врз база на определување на распределбата на тридимензионалното магнетно поле. Точноста со која ќе бидат определени електромагнетните големини во голема мерка зависи од прецизноста во пресметувањето на дистрибуцијата на електромагнетното поле во моторот. Методот на Конечни Елементи во 3D е многу ефикасен за прецизно определување на дистрибуцијата на електромагнетното поле. Користејќи дискретизација на тридимензионалниот домен на СММП, вклучувајќи ги граничните делови каде се распределени челните врски, со помош на методата на конечни елементи е определен магнетниот вектор потенцијал и неговата распределба во сите јазли од 3D-доменот. Резултатите се искористени исто така за определување на параметрите на моторот.

Клучни зборови:

Метода на Конечни Елементи, Синхрон Мотор, Испакнати Масивни Полови, Електромагнетни карактеристики, Параметри.

ABSTRACT:

This paper deals with a numerical computation of electromagnetic characteristics of a Solid Salient Poles Synchronous Motor on the basis of three dimensional magnetic field solutions. The accuracy with which the electromagnetic quantities are computed in a great rate is dependent on the precision of calculations of electromagnetic field distribution in the motor. The 3D Finite Element Method is very efficient for an accurate electromagnetic field solution. Using a discretization of a three dimensional domain of an electrical motor, including the end-regions where the windings overhangs are distributed, by means of finite element method the magnetic

vector potential and its distribution in the 3D-domain is determined. The results of the field computations, after they are used for calculations of the parameters, also.

1. ВОВЕД

Традиционалното проектирање на електричните мотори се базира на анализа на вртливите магнетни полиња и на аналитички методи. Таквите модели бараат доста експериментирања и користат многу емпириски равенки, а добиените резултати не се најпрецизни. Денес, проектирањето се заснива на нумеричка анализа на магнетното поле со примена на алгоритам за нелинеарна итеративна пресметка на распределбата на магнетното поле во тродимензионален домен на машината по методот на конечни елементи. Со тоа се добива голема прецизност при дизајнирањето на новите генерации на електрични мотори и нивните електромагнетни и механички карактеристики. При пресметувањата во овај труд се користи програмски пакет FEM-3D.

2. МОДЕЛИРАЊЕ ПО МЕТОДОТ НА КОНЕЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

Магнетното поле во доменот на електричните машини е дефинирано со системот Maxwell-ови равенки. Анализата на квазистационарното магнетно поле во електричните уреди многу се поедноставува со воведување на помошната големина на магнетниот вектор потенцијал \mathbf{A} , кој го задоволува условот $\text{div}\mathbf{A}=0$, за еднозначно определување на функцијата, а кој истовремено е поврзан со векторот на магнетната индукција преку равенката $\mathbf{B}=\text{rot}\mathbf{A}$. Сега, магнетното поле е опишано со парцијалната диференцијална равенка.

$$\text{rot}(\nu(\mathbf{B})\text{rot}(\mathbf{A}))=\mathbf{J} \quad (1)$$

каде ν :

$\nu(\mathbf{B})$ - магнетна проводност на материјалот која ја зема во предвид ламелираноста на статорското магнетно коло.

\mathbf{J} - волуменска густина на струјата.

Развиениот облик на оваа равенка во правоаголниот координатен систем (x,y,z) , е од типот на Poisson-овата равенка. Во домените каде што волуменската густина на струјата е еднаква на 0, равенката (1) преминува во Laplace-ова.

Дефинирањето на вредноста на магнетниот вектор потенцијал во секој јазол од конечните елементи на моторот, овозможува да се определи векторот на магнетната индукција во секој конечен елемент од моторот.

За еднозначноста во решавањето на горната равенка, треба да се дефинираат и дополнителни гранични услови и тоа:

① Гранични услови од прв тип, Dirichlet-ови услови, при кои на граничната површина која го ограничува разгледуваниот домен, се задава вредноста на магнетниот вектор потенцијал $A=\text{const}$.

② Гранични услови од втор тип, Neumann-ови услови, кои на границите на разгледуваниот домен ги дефинираат вредностите на деривацијата (изводот) на

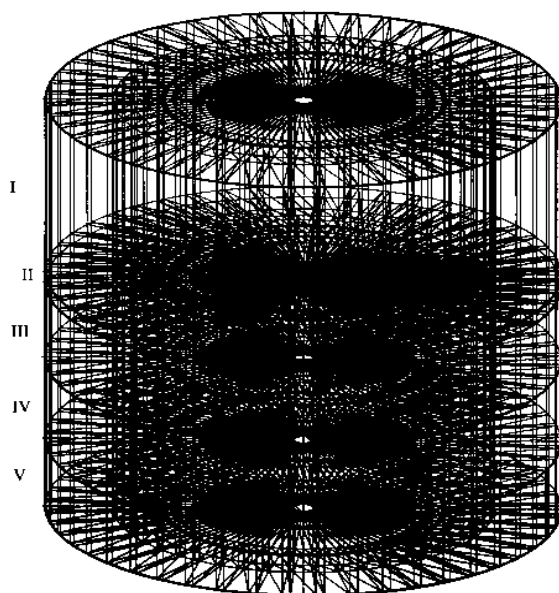
магнетниот вектор потенцијал A во однос на нормалата \mathbf{n} , во произволна точка на граничната контура $\frac{\partial A}{\partial n} = const.$ или $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ или

⊗ Мешани гранични услови.

При решавањето на равенката се користи принципот на Galerkin, кој смета дека магнетниот вектор потенцијал за секој конечен елемент е претставен со функција на обликот само на тој конечен елемент. Со оваа метода, решавањето на равенката (1) се сведува на решавање на систем алгебарски равенки, каде непознатите всушност се потенцијалите на јазлите.

2.1. Моделирање на магнетното коло на моторот

Магнетните кола на статорот и роторот, геометриски се апроксимираат со одреден број на носечки (пилот) макроелементи, во облик на четиристрана крива призма. Секој од тие макроелементи е дефиниран со координатите на дваесете темиња во однос на локален правоаголен координатен систем сместен во едно од темињата на макроелементот, а локалниот координатен систем е дефиниран со координатите (x,y,z) во однос на глобалниот правоаголен координатен систем, кој се наоѓа во оската на симетрија на моторот. Со ротација на секој пилот макроелемент за определен агол во однос на глобалниот правоаголен координатен систем, се добива вкупниот домен на моторот за еден слој во аксијален правец, по должината на z -оската. Моторот кој е тема на се опсервацијаа во овај труд, е определен со помош на 11 пилот макроелементи во еден аксијален слој. Потоа, макроелементите автоматски се делат на триаголни призматични конечни елементи. Целокупната мрежа на конечни елементи на СММП е потполно автоматски генерирана со 7680 конечни елементи, 5184 јазли во пет аксијални слоеви по должината на z -оската, како што е прикажано на слика 1.



Слика 1. 3D мрежа на конечни елементи на СММП.

Слоевите од (I до V) прикажани на сликата претставуваат:

- I слој-активен дел на моторот, каде завршува статорот.
- II слој -каде завршува роторот и опфаќа дел од челните врски на статорот.
- III слој- кој опфаќа дел од челните врски на статорската и роторската намотка.
- IV слој-ги опфаќа челните врски на статорската намотка.
- V слој, граничен слој од воздух.

2.2. Дефинирање на електричните извори на полето

Како еден од изворите на магнетното поле на моторот се зема волуменската густина на на струјата во статорските канали, дефинирана од струјата на оптоварување во трофазната статорска намотка. Бидејќи димензиите на конечните елементи во каналите се мали, густината на струјата е еднаква за секој конечен елемент, кој припаѓа на иста фаза.

Втор извор на полето е волуменската густина на еднонасочната возбудна струја во конечните елементи кои ја дефинираат роторската намотка. Со помош на додатни потпрограми се определуваат почените вредности на магнетните карактеристики на материјалот на секој од конечните елементи. Тие се почетни вредности за првата итерација. Крајните вредности на магнетните релуктации се добиваат со нелинеарна итеративна постапка и тоа после 11-тата итерација.

Дистрибуцијата на магнетното поле со посебни програми од програмскиот пакет FEM-3D се пресметува за различни оптоварувања во статорската намотка, различни оптоварувања во роторската намотка и различни аголни положби на роторот во однос на статорот кои се постигнуваат со симулации на ротирање на роторот во однос на статорот и тоа за агол од 360° , со чекор од 7.5° .

За секој поединечен случај на пресметување на распределбата на магнетното поле, со помош на посебен подпрограм, се добиваат вредностите на A_{\max} и A_{\min} , со чија помош понатаму се дефинира густината на еквипотенцијалните магнетни силиви линии кои ги поврзуваат точките со еднаков потенцијал $A = \text{konst.}$, со прираст ΔA . Потоа со посебен програм од програмскиот пакет FEM-3D, се прави графичка презентација на распределбата на магнетното поле во поединечните попречни пресеци на сите пет слоеви од моделираното магнетно коло на моторот [6].

3. ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИТЕ КАРАКТЕРИСТИКИ И PODOL@NA И ПОПРЕЧНА СИНХРОНАРЕАКТАНСА НА СММП

3.1. Пресметување на распределбата на магнетната индукција во воздушниот процеп

Вредностите на магнетниот вектор потенцијал A во сите јазли од 3D доменот на синхронниот мотор со испакнати масивни полови се пресметува по методот на конечни елементи. Средната вредност на магнетната индукција под еден магнетен пол како и нејзината распределба во воздушниот процеп на моторот се оперделува според равенството:

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A} \quad (2)$$

Имајќи го во предвид фактот дека промената на векторот на магнетната индукција е најголема по у оската т.е. по ортот \mathbf{j} , развиениот облик на горната равенка е:

$$B_{\delta} = \frac{\partial A_z}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial z} \quad (3)$$

Базирајќи се на фактот дека $\frac{\partial A_x}{\partial z} \rightarrow 0$, се занемарува, тогаш магнетната индукција меѓу два јазли од мрежата на конечни елементи под еден магнетен пол се пресметува:

$$B_{\delta n} = \frac{A_{zNx} - A_{zi}}{\tau_p} \quad (4)$$

τ_p - е еквилистантно растојание меѓу два јазли, нормално на правецот на векторот на магнетната индукција т.е. полни чекор.

3.2 Пресметување на основниот магнетен флуks

За пресметување на основниот магнетен флуks се разгледува поддоменот во кој се случуваат главните електромагнетни процеси во моторот, поточно, за негово определување се задржуваме во поддоменот на воздушниот процеп. Овај поддомен е дискретизиран на конечни елементи во тридимензионалниот домен. Се поставува локален координатен систем во однос на поддоменот од воздушниот процеп. Основниот магнетен флуks во овај поддомен е во правецот на у-оската и се пресметува:

$$\Psi_{\delta} = \frac{w_a}{2} \iint_S (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) dS = \frac{w_a}{2} \iint_A B_{n\delta} \cdot dS = \frac{w_a}{2} \int_1^{n_2} dz \int_1^{n_1} B_{n\delta} \cdot dx \quad (5)$$

w_a - број на навивки во фазата а.

Бидејќи l_s е должината на првиот аксијален слој по z-оската, основниот флуks се пресметува:

$$\Psi_{\delta} = \frac{w_a}{2} \cdot l_s \int_1^{n_1} B_{n\delta} \cdot dx \quad (6)$$

Имајќи го предвид равенството (3), за пресметување на магнетната индукција, а и податокот дека поддоменот во правец на x-оската е поделен на n_1 делови со должина Δx , а во правец на z-оската на n_2 делови со должина Δz , заменувајќи ги интегралите со суми, за пресметување на основниот магнетен флуks го добиваме равенството:

$$\Psi_{\delta} = \frac{w_a}{2} \cdot l_s \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{\partial A_z}{\partial x} \cdot \Delta x_i - \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\partial A_x}{\partial z} \cdot \Delta z_k \right] = \frac{w_a}{2} \cdot l_s (A_{z_{n_1}} - A_{z_1}) \quad (7)$$

Последната равенка се употребува за:

▫ Пресметување на основниот магнетен флуks во воздушниот процес на моторот, за различни оптоварувања во статорот (0-6)A, со чекор на промена на струјата од 0.5A, при што возбудната струја се одржува со номинална константна вредност 5.5 A, а роторот мирува.

▫ Истата постапка се повторува за симулирано вртење на роторот од (0-90)° механички степени (еден полов чекор), со чекор на аголот на ротација $\Delta\Theta = 7.5^\circ$.

Вредностите на магнетниот магнетен флуks во воздушниот процес се сместени во табела I.

3.3. Подолжна и попречна синхрона реактанса синхрона реактанса

Врз основа на вредностите на основниот магнетен флуks презентирани во табела I, се заклучува: кога роторот се наоѓа во положба на магнетната оска **d** во рамнината цврсто врзана за роторот и која се врти со синхрона брзина, магнетната оска на фазата **a** од статорот е дефазирана за агол од 30°. За тој агол на нивната дефазираност, основниот магнетен флуks по пар на магнетни полови при номинално оптоварување се читува од табела I:

$$2\Psi_{\delta d} = 2.113Vs \quad ; \quad I_{an} = 5.04A, \quad I_{fn} = 5.5A$$

Еквивалентната индуктивност на намотката по **d** оската е:

$$2L_{ad} = \frac{2\Psi_{\delta d}}{I_{an}} = \frac{2.113}{5.04} = 0.419H; \quad L_{ad} = 0.2095H \quad (8)$$

Односно подолжната синхрона реактанса е:

$$X_{ad} = \omega \cdot L_{ad} = 65.822\Omega, \quad (9)$$

или изразена во релативни единици во однос на номиналната импеданса на експерименталниот мотор:

$$X_{ad}^* = \frac{X_{ad}}{Z_{1N}} = \frac{68.822}{47.62} = 1.382 r.e. \quad (10)$$

На потполно идентичен начин се определува синхроната реактанса на моторот по неговата попречна оска. Од табелата I се читува вредноста на основниот магнетен флуks при номиналното оптоварување, кога роторот се завртил за 90°, односно е поставен во правецот на попречната оска **q**:

$$2\Psi_{aq} = 0.799Vs, \quad I_{an} = 5.04A, \quad I_{fn} = 5.5A$$

$$2L_{aq} = \frac{2\Psi_{aq}}{I_{an}} = \frac{0.799}{5.04} = 0.07927H \quad (11)$$

$$X_{aq} = \omega L_{aq} = 24.889\Omega \quad (12)$$

$$X_{aq}^* = 0.5226r.e.$$

4. ЗАКЛУЧОК

Програмскиот пакет и Методата на конечни елементи која е применета во овај труд, дава можност да се определат не само електромагнетните карактеристики на машината, ами и механичките карактеристики и нејзините параметри. Важно е да се напомене дека познавањето на дистрибуцијата на магнетното поле во 3D доменот на моторот овозможува да се пресметаат и растурните реактенси на челните врски на намотките, што е привилегија само на тродимензионалното пресметување на електромагнетното поле. Резултатите добиени по оваа метода се совпаѓаат со оние добиени по експериментален пат.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] J.F.Berkery, R.K.Barton, A.Konrad, "Automatic Finite-Element Grid Generation for Motor Design Analysis", IEEE Trans. On Maggn. Vol.20, No5, 1984.
- [2] J.R.Brauer E.A.Arison, K.G.McCaughey, W.N.Sullivan, "Three Dimensional Finite Element Calculation of Saturable Magnetic Fluxes and Torques of an Actuator", IEEE Trans. On Magn.. Vol. 24, No 1, 1988.
- [3] M. Cundev, L. Petkovska, "Three Dimensional Magnetic Field Analysis by The FEM", Actas 2as Jornnd. Luso-Espanholas, Coimbra, Portugal, 1991.
- [4] M. R. Popnikolova, M. Cundev, L. Petkovska, "From Macroelements to Finite Elements Grid Generation for Electrical Machines Field Analysis", Proc. of ISEF '95 Thessaloniki, Grece, 1995.
- [5] M. R. Popnikolova, M. Cundev, L. Petkovska, "Nonlinear Electromagnetic Field Calculation in Solid Salient Poles Synchronous Motor", Proc. of EPNC '96, Poznan, Poland, 1996.
- [6] M. R. Popnikolova, M. Cundev, L. Petkovska, "Finite Element method in the Function of Determination the Solid Salient Poles Synchronous Motor characteristics", Palermo, Sicilia, Italija. 1997.

Папастеревски Коста Дипл. Ел. инж.
ФОД - Новаци изведувач

ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА СТАТОРСКИ РАСПРЕДЕЛЕНИ НАМОТКИ НА ВИСОКОНАПОНСКИТЕ АСИНХРОНИ МОТОРИ

СОДРЖИНА

Одредувањето на димензиите на намотките представува значајна етапа при пресметка на новите електрични машини и при реконструкција на истите. Со определување на димензиите на намотките се определува потребата од електроизолационен материјал, електричниот отпор на намотката како и поедините функционални карактеристики на електричните машини. Во овој реферат прикажани се претежно основните релации и прописи за пресметување на димензиите на двослојни распределени намотки на високонапонските асинхрони мотори, како и нивната изработка.

ABSTRACT

Determination of dimensions of the spools is important stage in calculation and reconstruction of the electrical machines. Necessities of insulating materials, the electrical resistance of spools and some functional characteristics of electrical machines, can be defined with those dimensions.

This exposition concerns the basic relations and receipts for calculation of dimensions of two-layer-spools, contained in statics of high-voltage motors and their manufacturing.

1. ВОВЕД

Електричните машини за наизменична струја и високи напони воглавно се машини со големи можности. Заради големината на номиналниот напон, на струјата низ намотката како и режимот на работа на овие машини потребно е да се посвети посебно внимание при пресметувањето и извршувањето на поодделните операции за нивното производство или репродукција на истите.

Кај статорите на машините за наизменична струја и моќност поголема од 100 kW и напони повисоки од 660 V се користат проводници со правоаголен пресек.

Правоаголните проводници треба збиено да налегнат еден врз друг по целата нивна должина и во каналот да го завземат предходно определеното место. Затоа секциите со правоаголен проводник се поставуваат само во канали со правоаголен пресек. Секциите уште пред ставањето во каналите треба да ја добијат потребната форма и свиткувања на фронталните делови, па затоа процесот за изработка и пресметка на истите е сложен во однос на намотките со кружен пресек. Секциите во процесот на изработката се прават така да секоја секција е изолирана како едно тело во однос на јадрото на статорот и како такви се сместуваат во каналите.

При определувањето на димензиите на намотките се поаѓа од конструктивните елементи на машината како за новите, така и за оние кои се репарираат.

При реконструкција на машината потребно е да се репродуцираат сите димензии на намотките кои треба да бидат заменети во истата конструкција. Поради тоа пожелно е да се извадат дел од секциите од каналите со големо внимание.

Главни димензии на намотки се:

- пресек на проводници за намотки со и без изолација
- димензии на изолацијата на секцијата во каналот и во зоната на главата на секцијата
- димензии на навивките во делот од каналот и главата на навивката.

2. ПРЕСЕК НА ПРОВОДНИЦИТЕ ЗА НАМОТКИ

При утврдување на пресекот на проводниците за намотки се поаѓа од вредноста на струјата I_a низ истите. Пресекот се определува како за неизолоран така и за изолиран проводник со тоа што за изолиран проводник треба да се направи преглед на димензиите на заедничката изолација на секцијата и димензиите на каналот. Површината на пресекот на проводникот се пресметува по релацијата:

$$S_{\text{пров}} = \frac{I_a}{J_a} \quad [\text{mm}^2] \quad (1)$$

каде што:

I_a - струја низ намотките во А

J_a - густина на струјата одредена во согласност со табелата I

Табела I

Вредности на густината на струјата J_a [A/mm^2] ограничена од класата на изолација на намотката

| Тип на намотки | Густина на струјата ограничена од класата на изолацијата на намотката J_a [A/mm^2] | | |
|---|--|-----------|-----------|
| | А, Е | В, F | Н |
| Намотки за едностранни мотори | 3 - 5 | 4 - 6 | 5 - 7 |
| Намотки за наизменична струја за ротор | 3 - 5.5 | 4 - 6.5 | 5 - 7.5 |
| Намотки за наизменична струја за статор | 3 - 5 | 3.5 - 5.5 | 4.5 - 6.5 |

Димензиите на пресеците на проводниците се наоѓаат од површината на пресекот и тоа за проводници со правоаголен пресек димензиите a и b се сврстуваат во вредностите спрема DIN 46433

После определување на димензиите a и b се пресметува густината на струјата J_a [A / mm²].

$$J_a = \frac{I_a}{S_{\text{пров}}} \quad [\text{A} / \text{mm}^2] \quad (2)$$

која треба да биде во границите од табелата I

2.1. Определување на димензии на заедничката изолација на секциите во каналот

Пред определувањето на димензиите на изолацијата на секцијата во делот на каналот треба да се определи положбата на проводниците во каналот и на изолационите елементи, како и димензијата на истите. Од конструктивни причини и од познатата природна технологија, постоејќи тесна врска меѓу димензиите на изолацијата на секцијата и на каналот, утврдувањето на истите не може да биде независно. Кај новите машини што се проектираат димензиите на каналот се одредуваат едновремено со димензиите на изолацијата на секцијата, а кај електричните машини што се репарираат пред определувањето на димензиите на изолацијата на секцијата потребно е да се прецизираат димензиите на каналот.

Воглавно при една секција која има n_x проводници распоредени по ширина и n_y проводници распоредени по висина, димензиите на изолираниот проводник се $a' \times b'$, за димензиите h_{mcr} и b_{mcr} на изолацијата на секцијата во делот на каналот може да се користат следниве пресметки:

$$h_{\text{mcr}} = n_y \cdot b' + \Delta_{\text{izy}} + \sum y \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

$$b_{\text{mcr}} = n_x \cdot a' + \Delta_{\text{izx}} + \sum x \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

каде:

Δ_{izy} се добива од збирот на сите дебелини на изолацијата во правецот на y оската (по висина).

Δ_{izx} се добива од збирот на сите дебелини на изолацијата во правецот на x оската (по ширина).

$\sum y$ е лабавоста по висина и се пресметува по релацијата:

$$\sum y = 0.05 \cdot n_y \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

$\sum x$ е лабавоста по ширина и се пресметува по релацијата:

$$\sum x = 0.05 \cdot n_x + 0.2 \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

За коректно усогласување на димензиите на изолацијата на секцијата со оние на каналот во праксата се определуваат сите материјали и димензии што влегуваат во составот на изолацијата во каналот, со правење на скица за каналот и положбата на секцијата во каналот.

2.2. Фактор на пополнување на каналот

Имајќи ги во предвид димензиите на каналот и димензиите на надворешната изолација на секцијата потребно е да се провери како пресекот на каналот е искористен со внесување на секцијата. Оваа проверка е многу важна за добивање на индикатор кој покажува како ќе се реализира намотувањето, знаејќи дека намотувањето зависи во голема мерка од можноста за поставување на проводниците во каналот. За оваа цел се пресметува факторот на пополнување на каналот со релацијата:

$$K_u = \frac{N_{cr} \cdot S_{prov}}{S_{cr}} \quad (7)$$

каде:

N_{cr} - е бројот на проводници во каналот кој се одредува при вадењето на секциите од каналите едноставно со броење (доколку машината е во дефект), а во случај на пресметка на нови машини се одредува со релацијата:

$$N_{cr} = \frac{n_p \cdot N}{z} \quad (7a)$$

n_p - број на проводници поврзани паралелно со кои се реализира секцијата

N - целокупниот број на проводници определен со пресметка (за машини за наизменична струја $N = 2mW.a$)

z - број на канали.

S_{prov} - површина на пресекот на еден неизолиран проводник кој во случај а правоаголен проводник е $a \times b$.

S_{cr} - целокупна површина на каналот (пресек на штанцирањето) која се утврдува во зависност од типот и димензиите на каналот. Кај високонапонските асинхрони мотори со големи моќности се користи отворен тип на канал. На сл.1 се дадени два вида на отворени канали, а подолу се дадени формулите и пресметаните површини на истите.



Сл.1 - видови на отворени канали

За сл.1а важат следните релации:

$$S_{cr} = b_c \cdot h + 0.5 \cdot h' \cdot (b_c + b_1) \quad (8)$$

$$h = h_c - h' - h_y \quad (9)$$

$$S_{cr}' = (b_c - 2\Delta)(h - \Delta) + 0.5 \cdot h' \cdot (b_c + b_1 - 4\Delta) - h_p \cdot (b_{1p} - b_{2p}) \cdot 0.5 \quad (10)$$

За сл.1б важат следните релации:

$$S_{cr} = b_1 \cdot h + 0.5 \cdot h' \cdot (b_c + b_1) \quad (11)$$

$$h = h_c - h' - h_y \quad (12)$$

$$S_{cr}' = (b_c - 2\Delta)(h - \Delta) + 0.5 \cdot h' \cdot (b_c + b_1 - 4\Delta) - h_p \cdot (b_{1p} - b_{2p}) \cdot 0.5 \quad (13)$$

За двата видови на канали може да се дадат следните забелешки:

$$\Delta = \Delta_{iz} + 0.1 \text{ [mm]} \quad (14)$$

каде:

Δ_{iz} е дебелина на изолацијата

h_p, b_{1p}, b_{2p} - димензии на клинот ($h_p=h'$; $b_{1p}=b_1$; $b_{2p}=b_c$)

Вредностите S_{cr}' од равенките (10) и (13) се користат за одредување на фактор на пополнување на намотка према релацијата:

$$K_{u2} = \frac{N_{cr} \cdot a' \cdot b'}{S_{cr}'} \quad (15)$$

каде:

a' и b' се димензии на изолиран проводник

S_{cr}' е пресек на каналот кој е намален од целокупната површина на каналот за површините на клинот и изолацијата на каналот замајќи ги во предвид намалувањето од 0.1 mm.

3. ДИМЕНЗИИ НА СЕКЦИИТЕ НА НАМОТКИТЕ ЗА НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА

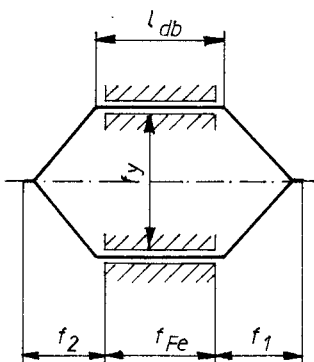
Високонапонските асинхрони мотори имаат намотки изведени од секции. Потребно е секоја секција да ја добие потребната форма со потребните свиткувања на фронталните делови. Секциите се ставаат во отворени канали и во процесот на изработката се прават така да секоја секција е изолирана како едно тело во однос на јадрото на статорот. Секоја секција е составена од две или повеќе навивки.

За секциите на намотките за наизменична струја се определуваат следните основни димензии (дадени на сл.2) :

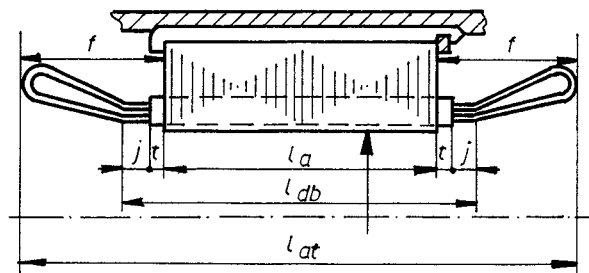
l_{db} - димензии на правиот дел на секцијата

f - аксијална должина на главата на секцијата

l_w - средна должина на навивка



Сл.2 - спецификација на основните димензии на секцијата за намотки на наизменична струја



Сл.3 - одредување на димензиите на правиот дел на секцијата

l_{db} - должина на превиот дел на секцијата

l_{db} - отвореност на секцијата

f_{fe} - должина на јадрото

f_1 и f_2 – аксијални должини на главата на секцијата

l_a - активна должина на секцијата

l_{at} - вкупна аксијална должина на секцијата

3.1. Должина на правиот дел на секцијата l_{db}

На сликата 3 се гледа начинот на поставување на секциите во статорот, како и должината на правиот дел на секцијата која се пресметува од релацијата:

$$l_{db} = l_{fe} + 2(t + j) \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

Во табелата II се дадени вообичаените вредности за продолжувањата $(t + j)$ од каналот

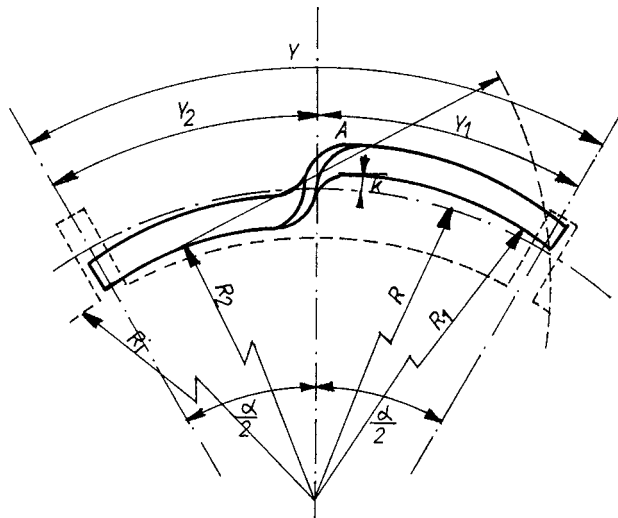
Табела II

| Номинален напон на намотката (V) | $(t + j)$ [mm] |
|----------------------------------|----------------|
| до 500 | 20 - 25 |
| 3000 - 3300 | 35 - 40 |
| 6000 - 6300 | 50 - 55 |

3.2. Отвореност на секцијата l_y

Генерално, отвореноста l_y (на сл.4 означена како Y) на секцијата се одредува поаѓајќи од чекорот на намотување у даден во број на канали. За намотки поставени во статор и према сл.4 се определува:

$$l_y = \frac{\pi \cdot (2R_i + h_c)}{Z} y = \frac{\pi \cdot (D_i + h_c)}{Z} y \quad [\text{mm}] \quad (17)$$



Сл.4 - сместување на секциите на намотките за наизменична струја во статор

Y - отвореност на секцијата

R_i - внатрешен радиус на пакетот од лимови на статорот

R_1 - радиус на долниот дел на секцијата определен од висината на изолацијата на дното на каналот

R_2 - радиус на горниот дел на секцијата определен од висината на изолацијата меѓу двата слоеви

R - радиус на средината на каналот

α - агол од центарот на статорот адекватен на отвореноста на секцијата

Во релацијата (17) со D_i се означени внатрешниот дијаметар на пакетот лимови на статорот и Z е бројот на канали.

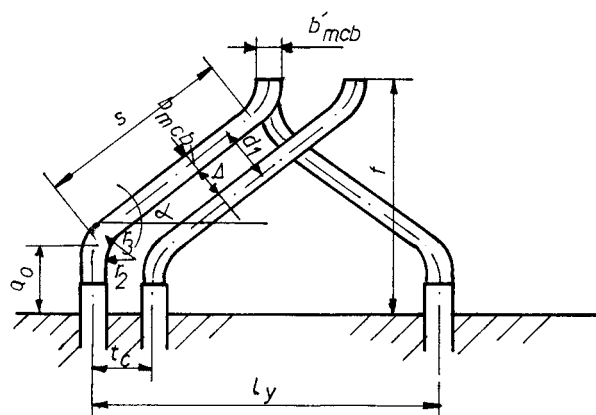
3.3. Димензии на главата на секцијата

За двослојни намотки се постапува различно при поставувањето на намотките во статор или ротор, како и во зависност од типот на намотките. Во случај на тврди намотки поставени во статор спрема сл.4 и сл.5, димензиите на главата на секциите се пресметува на следниот начин.

- растојание Δ меѓу две секции како и a_0 се дадени во табела III.

Табела III

| Номинален напон на намотката (V) | Вредности во [mm] на котите од сл.6 | |
|----------------------------------|-------------------------------------|---------|
| | Δ | a_0 |
| до 500 | 4.0 - 4.5 | 20 - 25 |
| 3000 3300 | 4.5 - 5.0 | 35 - 40 |
| 6000 - 6600 | 5.0 - 5.5 | 40 - 66 |



Сл.5 - димензионирање на главата на секциите на намотки за наизменична струја реализирани со правоаголен проводник и сместени во статор

- растојанието меѓу средните линии на секциите

$$d_1 = b_{mcb} + \Delta \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

За секции со континуирана изолација $b_{mcb} = b_c$ (ширина на каналот)

- аголот α во однос на пакетот лимови на статорот е :

$$\sin \alpha = \frac{d_1}{\pi \cdot D_1} z \quad (19)$$

- должината на проводниците во зоната на главата на намотката

$$l_{cb} = k_1 \left[(l_y \gamma) - \left(r_1 + \frac{h_1}{4} \right) \right] + \pi \left(r_2 + \frac{h_1}{2} \right) + k_2 r_3 + 2\Delta \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

Овде k_1 и k_2 се дадени во табелата IV

r_1 - радиус на свиткување на фронталниот дел на на капата на секцијата кој ги сврзува деловите од горниот и долниот дел на секцијата.

За напон од 3000 V $r_1=12$ mm а за 6000 V, $r_1=15$ mm

$r_2=25$ mm за секции кои не се изолирани со миканитна лента

$r_1=50$ mm за секција изолирана со миканит

$$r_3 = r_2 + \frac{b}{2} \quad (b \text{ е ширина на проводникот})$$

Табела IV

| α° | k_1 | k_2 | k_3 | α° | k_1 | k_2 | k_3 |
|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| 30 | 1.15 | 0.94 | 0.58 | 38 | 1.27 | 0.84 | 0.49 |
| 31 | 1.17 | 0.93 | 0.47 | 39 | 1.29 | 0.83 | 0.48 |
| 32 | 1.18 | 0.92 | 0.56 | 40 | 1.31 | 0.82 | 0.47 |
| 33 | 1.19 | 0.91 | 0.54 | 41 | 1.33 | 0.80 | 0.46 |
| 34 | 1.21 | 0.90 | 0.53 | 42 | 1.35 | 0.79 | 0.45 |
| 35 | 1.22 | 0.89 | 0.52 | 43 | 1.37 | 0.77 | 0.44 |
| 36 | 1.24 | 0.87 | 0.51 | 44 | 1.39 | 0.75 | 0.43 |
| 37 | 1.25 | 0.85 | 0.50 | 45 | 1.41 | 0.74 | 0.41 |

- коефициентот γ се пресметува само за двополни машини:

$$\gamma = \frac{Z \cdot \sin \frac{\pi \cdot y}{Z}}{\pi \cdot y} \quad (21)$$

(y е чекор на намотување изразен во канали); за $2p > 2 \Rightarrow \gamma = 1$

- аксијалната должина на секцијата f :

$$f = \frac{l_y}{z} \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha + k_3 \cdot r_3 + \Delta + \frac{h_1}{2} \quad [\text{mm}] \quad (22)$$

- величината k од сл.4 која покажува колку капата на секцијата е оддалечена од правиот дел на секцијата (од каналот) се пресметува по релацијата:

$$k = (f - h_c - r_1) \cdot \operatorname{tg} \beta \quad [\text{mm}] \quad (23)$$

каде $\beta = 6^\circ - 8^\circ$, а $r_1 = 10 - 15$ mm

Радиусот A од сл.4 се пресметува со помош на следната релација:

$$A = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos(\alpha_1 - 2\gamma_1)} \quad (24)$$

во која α_1 е аголот од центарот, адекватен на отвореноста на секцијата и :

$$\alpha_1 = \frac{360y}{Z} \quad (y \text{ е чекорот во број на канали}) \quad (25)$$

Аголот γ_1 се наоѓа од релацијата:

$$\sin \gamma_1 = \frac{b_{\text{mcb}} \text{ неизолиран}}{2R_2} \quad (26)$$

b_{mcb} неизолиран - дебелина на секцијата без изолација

4. ИЗРАБОТКА НА СТАТОРСКИТЕ РАСПРЕДЕЛЕНИ НАМОТКИ ЗА НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА

Изработката на секциите односно нивното формирање според пресметаните вредности представува една од основните етапи пред намотувањето на статорот на електричните машини. Извршувањето на операциите неопходни за оваа цел зависи од типот на намотките, конструкцијата на истите, пресекот на проводниците и користената изолација.

Основни фази на технологијата во процесот на изработка на секциите се:

- формирање на секциите според потребните димензии
- изолирање на секциите
- импрегнирање на секциите
- контрола на квалитетот на секциите

Пред да се оди на изработка на секциите потребно е да се определи типот на истата, бројот на навивки, димензиите и проводникот за намотување.

За изработка на секциите се користат шаблони, кои се по тип или конструкција различни.

Во праксата на намотување на ел. машини, во функција од бројот на секции кои треба да се реализираат се прибегнува кон шаблони чии димензии се фиксни (за изработка на голем број секции) и шаблони кои се регулираат (за изработка на секции со разни димензии или мал број на секции со разни димензии, нарочно во работилници за репарација).

За постигнување на правилна форма на секциите се прибегнува кон направи со кои се врши комплетно затегање и истовремено правилно ондулирање на секцијата.

За оваа цел се користат пневматски машини, кои даваат сигурност и едноставност при изработката на секциите. Вака изработените секции немаат доволна механичка цврстина. Затоа се врши изолирање на целата секција како едно тело во однос на јадрото. Следна операција е пресирање на активните делови на секциите со помош на специјални уреди при што се загреваат 3 часа на температура од 120° - 135° (во случај на изолација од миканит) или 90 min. на 145° . После ова секциите се механички поцврсти со што е намалена можноста од нивно оштетување при процесот на намотување.

После поставувањето на секциите во каналите, истите се поврзуваат меѓу нив, во согласност со шемата на електричната машина. Пред нивното импрегнирање се врши напонско испитување на изолацијата на намотките према јадрото и монофазно. Овие испитувања се вршат согласно пропишаните норми за испитување на издржливоста на изолацијата на високонапонските електрични машини.

ЗАКЛУЧОК

Извршувањето на операциите поврзани со намотувањето на електричните машини зависи во голема мера од определувањето на димензиите на намотките. Затоа е потребно прецизно да се изврши пресметката на димензиите на секциите, додека при реконструкција на електричните машини потребно е што поточно да се снимаат постоечките намотки.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. С. Bala, A. Fetita, V. Lefter ; “CARTEA BOBINATORULUI de MASINI ELECTRICE” Editura Tehnica - Bucuresti - 1978
2. Б. К. Клоков ; “ОБМОТЧИК ЕЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИИ” Москва 1989
3. N. V. Vinogradov ; “FABRICAREA MASINILOR ELECTRICE” Editura Tehnica - 1976

4. МОЖНИ ПРАШАЊА

1. Начини на изолирање на секциите ?
2. Начин на поставување на секциите при процесот на намотување ?
3. Видови на шаблони кои се користат за изработка на секциите ?

м-р Здравко Андонов
Електротехнички факултет - Скопје

МОДЕЛ НА ПОГОН СО АСИНХРОН МОТОР БАЗИРАН НА КАТАЛОШКИ ПОДАТОЦИ

СОДРЖИНА

Електромоторните погони со асинхрони кафезни мотори се најзастапени во индустријата. Брзиот развој на енергетската електроника и техниките за автоматска регулација на брзината овозможуваат погоните со асинхрони кафезни мотори се повеќе да го освојуваат и пазарот на регулирани електромоторни погони. Современите електромоторни погони со векторска регулација на брзината и директна регулација на моментот бараат точно познавање на параметрите на асинхронниот мотор.

Определувањето на параметрите може да се направи експериментално, со моделирање на моторот преку каталошки податоци и преку примена на методите на идентификација. Моделирањето преку каталошки податоци се користи да се добијат типски вредности на параметрите, кои потоа по потреба со методите за идентификација на параметри се уточнуваат.

Во овој труд е даден модел на асинхрон кафезен мотор кој овозможува отпорностите и индуктивностите на моторот да се пресметаат преку каталошки податоци. Во моделот параметрите на моторот се функции зависни од промената на брзината и струјата. Развиениот модел е искористен за определување на параметрите на асинхрон кафезен мотор со моќност од 132 kW производ на "СЕВЕР" - Југославија.

Пресметаните отпорности и индуктивности и законите на нивната промена се вклучени во динамички модел на асинхрон мотор. За верификација на предложените модели симулационите резултати за пуштање на моторот со преклопка ѕвезда-триаголник се споредени со измерените за погон на пумпа со 132 kW асинхрон кафезен мотор во "Топлификација" - Скопје.

ABSTRACT

Squirrel cage induction motor (SCIM) drives are the most implemented in the industry. The fast development of power electronics and speed control techniques allow SCIM drives to take over speed control market. The modern vector control and direct torque drives need exact induction motor parameters.

The parameter estimation can be done experimentally, with SCIM modeling using catalogue data and with parameter identification methods. Modeling via catalogue data is used for estimation of typical motor parameters, which can be accurated with parameter identification methods.

In this paper, the developed model of SCIM can be used for motor resistances and inductances estimation. In this model motor parameters are variable depending on rotor speed and currents. The developed model is used for the parameter estimation of 132 kW induction motor produced by "SEVER" - Yugoslavia

The estimated resistances and inductances values and the laws of their change are implemented in the arbitrary reference frame model of SCIM. For the method verification, the simulation results for star-delta start up of SCIM are compared with measured ones for pump drive in the "Toplifikacija" - Skopje. The simulated and measured values are also very close.

КЛУЧНИ ЗБОРОВИ: Електромоторен погон, модел на асинхрон кафезен мотор, каталошки податоци, динамички модел, определување на параметри

1. ВОВЕД

Асинхроните кафезни мотори (АКМ) се користат во електромоторните погони каде е потребна примена на едноставна и робустна машина. Затоа, асинхроните претставуваат повеќе од 85 % од сите инсталирани наизменични погони, со моќност од неколку вати до преку 10 MW. Во последно време, како резултат на развој на енергетската електроника и на системите за управување, АКМ се почесто ги заменуваат и еднонасочните регулирани погони.

Кај регулираните погони со АКМ и микроконтролерски-базираните заштитни релеи е потребен добар динамички модел на погонот. Затоа е потребно познавање на параметрите на моторот, бидејќи од точноста на параметрите зависи и точноста на моделот.

Еден од најголемите проблеми за било кој модел на АКМ е определувањето на активните и реактивните отпорности на статорот, роторот и магнетното коло. Методите за определување на параметрите на АКМ базирани на каталошки податоци се најпогодни кај големите АКМ, бидејќи експерименталните методи за определување на параметрите бараат скапа експериментална опрема и познавање на геометриските димензии на статорските и роторските канали и проводници.

Основната теорија на произволна референтна ооска овозможува анализа на динамичкото однесување на АКМ, но ефектите на потискување на струјата во роторот, заситување на магнетното коло и тн. не се вклучени во моделот. Затоа, при примена на оваа теорија за големи АКМ треба овие ефекти да се вклучат во моделот. Во овој труд ќе биде претставен динамички модел на моторот во кој се вклучени овие ефекти, а кој е базиран на определените параметри со примена на каталошки податоци.

Моделот е проверен преку мерења изведени на 132 kW погон на пумпа со АКМ. Мерените и симулираните карактеристики покажуваат многу добро совпаѓање.

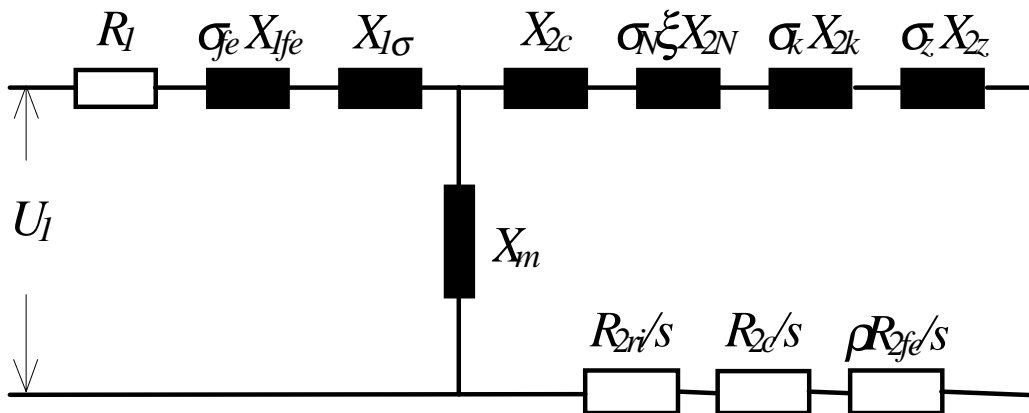
2. МОДЕЛ НА МОТОР БАЗИРАН НА КАТАЛОШКИ ПОДАТОЦИ

Во секој каталог се дадени следните податоци за АКМ: номинална моќност P_n , номинална струја I_n , номинален фактор на моќност $\cos\phi_n$, номинален коефициент на полезно дејство η_n , струја I_p и момент M_p на куса врска, критичен момент M_k и спој на намотките. При определувањето на параметрите во презентираниот модел се користат само овие податоци.

1.1. Основи на моделот

Активните и реактивните отпорности на статорот, роторот и магнетното коло можат да се определат со помош на каталошки податоци. Постојат повеќе методи за определување на параметрите на АКМ преку каталошки податоци, при што е нужно познавање на номиналните податоци како и податоците за струја и момент на куса врска и критичниот момент. Основната идеја е со примена на еквивалентната шема на асинхрон мотор за стационарен режим на работа да се определат параметрите и тоа така да пресметаните карактеристики на моторот бидат што е можно поблизу до познатите каталошки податоци.

Користената еквивалентна шема мора да одговара на реалните состојби во моторот, па затоа во неа мораат да се вклучат и ефектите како заситување на магнетното коло, потискување на струјата во роторските проводници и тн. Секој од овие ефекти може да се вклучи во моделот со примена на посебен корекционен фактор кој ќе го претставува влијанието на ефектот. Еквивалентната шема за секоја фаза е прикажана на Слика 1.



Слика 1 Еквивалентна шема на една фаза на асинхрон мотор со претставување на сите ефекти врз активните и реактивните отпорности

Значењето на поедините отпорности и коефициенти на Слика 1 е: X_m е индуктивна отпорност на магнетизирање, R_l е отпорност на статорот, $X_{l\sigma}$ е дел од статорската индуктивна отпорност на растурање, која не зависи од заситувањето на магнетното коло (го претставува растурниот флуks во воздухот), X_{lfe} е дел од статорската индуктивна отпорност на растурање, која зависи од заситувањето на

магнетното коло (го претставува растурниот флуks во магнетното коло) со коефициент на намалување на индуктивноста σ_{fe} , X_{2c} е дел од индуктивната отпорност на растурање на роторот, кој не зависи ниту од фреквенцијата ниту од заситувањето, X_{2N} е дел од индуктивната отпорност на растурање на роторот, кој зависи од заситувањето на магнетното коло и од скин ефектот со коефициенти σ_N и ξ , X_{2k} е дел од индуктивната отпорност на растурање во забите на роторот кој зависи од заситувањето со коефициент на намалување на индуктивноста σ_k , X_{2z} е дел од индуктивната отпорност на растурање на роторот кој зависи од заситувањето со коефициент на намалување σ_z , R_{2r} е отпорност на краткоспојниот прстен на роторот, R_{2fe} е дел од отпорноста на роторските стапови, кој се наоѓа во магнетното коло (зависи од фреквенцијата) со коефициент ρ , R_{2c} е дел од отпорноста на роторските стапови, кој не се наоѓа во магнетното коло (не зависи од фреквенцијата), s е лизгање.

Во еквивалентната шема не е земено во предвид влијанието на загубите во магнетното коло, бидејќи тие се релативно мали, а оваа претпоставка внесува многу мала грешка во натамошните пресметки. Вкупните индуктивности и отпорности ќе бидат:

$$L_1 = L_{1\sigma} + \sigma_{fe} L_{1fe} \quad (1)$$

$$L_2 = L_{2c} + \sigma_k L_{2k} + \xi \sigma_N L_{2N} + \sigma_z L_{2z} \quad (2)$$

$$R_2 = R_{2c} + \rho R_{2fe} + R_{2r} \quad (3)$$

За жал со ваквата шема не е можно определување на сите коефициенти на индуктивностите, па затоа сите коефициенти треба да се заменат само со еден:

$$\sigma_{fe} = \sigma_N = \sigma_k = \sigma_z = \sigma \quad (4)$$

Со ова се прави определена грешка, но таа не е многу голема, бидејќи и онака во пресметките се користат само вкупните вредности на отпорностите и индуктивностите.

Кога АКМ работи со стационарна брзина блиска до номиналната, тогаш наведените ефекти не се изразени, па вредностите на коефициентите ќе бидат:

$$\sigma = \sigma_{fe} = \sigma_N = \sigma_k = \sigma_z = \rho = \xi = 1 \quad (5)$$

Имајќи ја во предвид равенката (5) параметрите на моторот можат да се определат во два чекора:

- Прво со употреба на номиналните податоци можат да се определат индуктивностите и отпорностите во номинален режим на работа;
- А потоа преку податоците од куса врска и критичен момент се определуваат соодветните коефициенти и карактеристиките на моторот за произволна брзина.

Основните, ориентациони вредности на отпорностите се определуваат само со примена на едноставни равенки кои се базираат на физичките закони кои владеат во моторот или пак се резултат на искуството во примена на АКМ.

Корекцијата на вака пресметаните вредности може да се изврши со примена на различни математички методи. Во овој случај е користена методата на сензитивна анализа.

1.2. Примена на методата на сензитивна анализа

Нелинеарното однесување на асинхроните машини и сложената меѓусебна зависност на параметрите го прават многу тешко добивањето на точни и едновремено прифатливи равенки, со кои едновремено ќе се добијат точни податоци

за параметрите на еквивалентното коло и точни карактеристики на машината. Тоа, заедно со поедноставувањата кои се направени при пресметувањето на параметрите доведува до тоа да не можат да се постигнат реалните карактеристики на машината. Затоа е потребна нивна корекција и тоа земајќи ја во предвид нелинеарноста на моторот и зависностите кои не се внесени во равенките.

Корекцијата на параметрите, за да е добијат поточни карактеристики на машината, може да се изврши со повеќе корекциони фактори применети од методата на сензитивна анализа, со земање во предвид на секој параметар на колото.

Осетливоста на променливата Y во зависност од параметарот β претставува парцијален извод на Y по β . Вредностите со кои се започнува сензитивната анализа се оние веќе претходно добиени. Равенката со која се опишува сензитивноста на Y од β е дадена со равенката:

$$\delta_{Y,\beta} = -\frac{\partial Y}{\partial \beta} \frac{\beta}{Y} \quad (6)$$

Во нашиот случај со Y се претставени: $M_n, I_n, \cos \varphi_n, n_n, \eta_n, M_k, I_p$ и M_p . Со β се претставени параметрите: $R_1, R_2, X_1, X_2, X_m, R_{2k}, X_{1k}$ и X_{2k} .

Поединечните сензитивни равенки се многу сложени и тешки за пресметка.

Со користење на последните расположиви вредности на параметрите, се пресметуваат факторите на сензитивност, а потоа се пресметува факторот на корекција. На пример, факторот на корекција на R_1 може да се пресмета според:

$$\begin{aligned} Kor_{R_1} = & \delta_{\cos \varphi_n, R_1} (1 - \cos \varphi_{n,d} / \cos \varphi_{n,p}) + \delta_{\eta_n, R_1} (1 - \eta_{n,d} / \eta_{n,p}) + \\ & + \delta_{M_n, R_1} (1 - M_{n,d} / M_{n,p}) + \delta_{I_n, R_1} (1 - I_{n,d} / I_{n,p}) + \delta_{n_n, R_1} (1 - n_{n,d} / n_{n,p}) + \\ & + \delta_{M_k, R_1} (1 - M_{k,d} / M_{k,p}) + \delta_{I_p, R_1} (1 - I_{p,d} / I_{p,p}) + \delta_{M_p, R_1} (1 - M_{p,d} / M_{p,p}) \end{aligned} \quad (7)$$

каде со вториот индекс d и p се означени дадените и пресметаните вредности на поедините променливи.

Со вака пресметаните корекционите фактори се врши корекција на пресметаните вредности на параметрите. На пример, новата вредност на R_1 ќе биде:

$$R_{1,n} = R_{1,s} (1 + F_r Kor_{R_1}) \quad (8)$$

каде со вторите индекси n и s се означени новата и старата вредност. Со F_r е означен тежинскиот фактор кој во почетокот на пресметките има мала вредност, па како процесот конвергира му се зголемува вредноста.

1.3. Пример за определување на параметри на асинхрон мотор

Со прикажаниот модел на АКМ е изработена компјутерска програма за пресметка на параметрите со програмскиот пакет МАТЛАВ. Со него се пресметани параметрите на АКМ тип ZK 315 M-4, производ на "СЕВЕР" –Југославија кој се користи за погон на пумпа. Моторот ги има следните каталожки податоци:

$P_n=132$ kW; $U_n=380$ V; $I_n= 255$ A; $n_n=1485$ min⁻¹; $\eta_n=0,93$; $\cos \varphi_n=0,85$; $I_p = 6,5 I_n$; $M_p= 2,6 M_n$; $M_k=2,6 M_n$; $f=50$ Hz; спој на намотките во Δ .

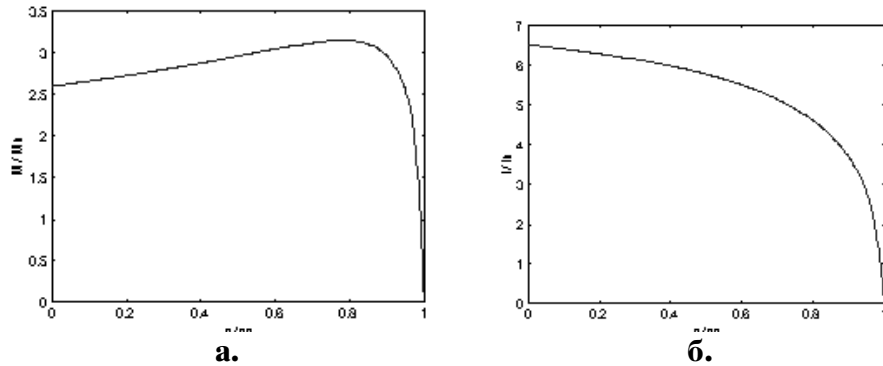
Пресметките се вршени се додека разликата меѓу пресметаните и каталожките податоци не е помала од 1 % за сите каталожки податоци.

Во табела I се прикажани пресметаните вредности за дадениот мотор.

Табела I Пресметани вредности на параметрите на мотор "СЕВЕР", 132 kW

| | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| | R_1 | X_1 | R_2 | X_2 | X_m | X_{1p} | R_{2p} | X_{2p} |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Пресметани вредности [Ω] | 0,0276 | 0,2214 | 0,0280 | 0,4294 | 6,9418 | 0,1886 | 0,1316 | 0,1782 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|



Слика 2 Механичка (а) и електромеханичка (б) карактеристика

Со пресметаните параметри се определени механичката и електромеханичката карактеристика прикажани на Слика 2 а и б соодветно.

2. ДИНАМИЧКИ МОДЕЛ НА АСИНХРОН КАФЕЗЕН МОТОР

Класичните начини за анализа на АКМ со шемата прикажана во претходното поглавје не се погодни за анализа на динамичкото однесување на АКМ. За таа цел се користи модерната теорија на произволна референтна оска, посебно при регулација на брзината или пак за заштита на електромотроните погони.

Бидејќи анализата на трифазниот систем во општ случај се врши со сложени диференцијални равенки, кои практично се неупотребливи, повеќефазниот систем се трансформира во двофазен систем со референтна оска која се движи со произволна брзина.

При оваа трансформација координатниот систем вообичаено се врзува за:

- статорот (неподвижен е)
- роторот (се движи со брзина на роторот) и
- магнетното поле (се движи со синхрона брзина).

Равенките со кои се дефинира моторот за произволна референтна оска се:

$$\begin{aligned}
 p i_{q1} &= -\frac{\omega_b}{D} \left[(X'_{rr} R_1) i'_{q1} + \left(\omega \frac{D}{\omega_b} + X_m^2 \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) i'_{d1} - (X_m R_2) i'_{q2} + \left(X'_{rr} X_m \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) i'_{d2} \right] + \frac{\omega_b X'_{rr}}{D} v_{q1} \\
 p i_{d1} &= -\frac{\omega_b}{D} \left[-\left(\omega \frac{D}{\omega_b} + X_m^2 \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) i'_{qs} + (X'_{rr} R_1) i'_{ds} - \left(X'_{rr} X_m \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) i'_{q2} - (X_m R_2) i'_{d2} \right] + \frac{\omega_b X'_{rr}}{D} v_{d1} \\
 p i'_{q2} &= -\frac{\omega_b}{D} \left[-(X_m R_1) i'_{q1} - \left(X_{ss} X_m \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) i'_{ds} + (X_{ss} R_2) i'_{q2} + \left(\omega \frac{D}{\omega_b} - X_{ss} X'_{rr} \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) i'_{d2} \right] - \frac{\omega_b X_m}{D} v_{q1} \\
 p i'_{d2} &= -\frac{\omega_b}{D} \left[\left(X_{ss} X_m \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) i'_{q1} - (X_m R_1) i'_{ds} - \left(\omega \frac{D}{\omega_b} - X_{ss} X'_{rr} \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) i'_{q2} + (X_{ss} R_2) i'_{d2} \right] - \frac{\omega_b X_m}{D} v_{d1}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Во равенката (9) ознаките се: $p = d/dt$, $X_{ss} = X_1 + X_m$, $X_{rr} = X_2 + X_m$, ω_r е аголна брзина на роторот, ω_b е аголна брзина на референтната оска, i_{ds} , i_{qs} ,

i_{dr} , i_{qr} се статорските и роторските струи по d и q оските, u_{ds} , u_{qs} се статорските напони по d и q оската и $D = X_{ss}X'_{rr} - X_m^2$.

За да се опише електромоторниот погон во дадениот систем на равенки е потребно да се додадат и равенките кои го опишуваат движењето:

$$p\theta_r = \omega_r \quad (10)$$

$$J p\omega_r = M_m - M_s \quad (11)$$

каде:

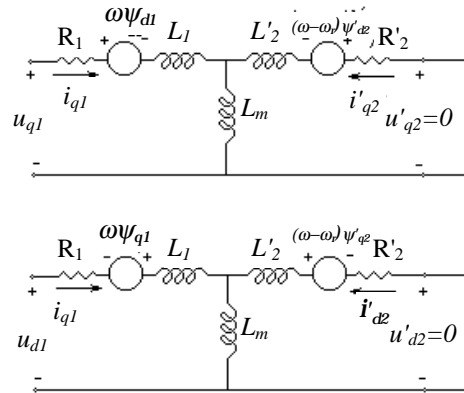
J е моменет на инерција на вртливите маси, M_s е статичкиот момент и M_m е моментот на моторот дефиниран со равенката:

$$T_m = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_m (i_{q1}i'_{d2} - i_{d1}i'_{q2}) \quad (12)$$

Ако товарот е со центрифугална карактеристика, равенката за M_s е:

$$T_l = k\omega^2 \quad (13)$$

Еквивалентната шема на АКМ во двоквадрантен систем е прикажана на Слика 3.



Слика 3 Еквивалентна шема на АКМ во двоквадрантен систем

Ако се познати компонентите на струјата по d и q оската, ефективните вредности на струјата и напонот можат да се пресметаат според равенките:

$$u_1 = (u_{d1}^2 + u_{q1}^2)^{1/2} \quad (14)$$

$$i_1 = (i_{d1}^2 + i_{q1}^2)^{1/2}$$

Во основниот модел прикажан со претходните равенки, ефектите на заситување на магнетното коло, промена на роторските параметри поради скин ефект и тн се занемарени. Нивното влијание може да се вклучи во моделот на два начини:

- Со додавање на дополнителни статорски и роторски отпорности за секој ефект, чија промена е дадена со определен математички закон (најчесто многу сложен и за чија примена е потребно познавање на определени геометриски димензии) и ;
- Со употреба на пресметани (променливи) параметри со некоја од методите за определување на параметри.

Во развиениот модел се користи вториот пристап. За секој чекор на пресметки, во зависност од струјата и лизгањето се пресметуваат соодветните статорски и роторски отпорности.

2.1. Резултати од динамичката нализа со променливи параметри определени преку каталошки податоци

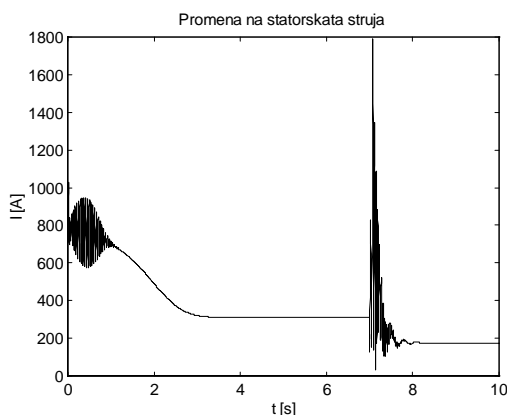
Пресметаните променливи отпорности кои се дадени во делот 2 се искористени како влезни податоци за развиената компјутерска програма за динамичка анализа на АКМ. Програмата е развиена во програмскиот пакет МАТЛАВ. Системот на диференцијални равенки се решава со примена на методата Рунге-Кута од петти ред.

Користениот АКМ се користи за погон на центрифугална пумпа за вода кај која протокот се регулира класично со вентили.

Пуштањето на моторот се врши со преклопка ѕвезда-триаголник, при што преклопувањето настанува седум секунди по вклучувањето во ѕвезда.

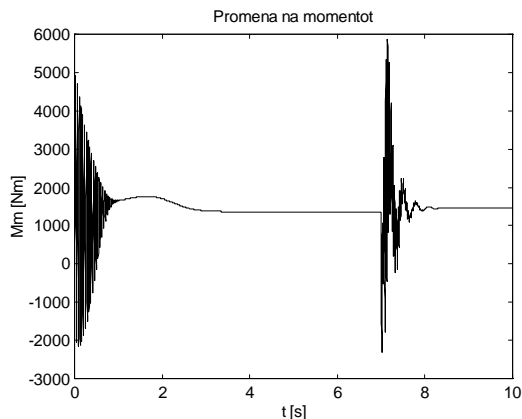
Пресметките се вршени за следните услови на работа. Пумпата работи со затворен вентил, при што предадената моќност на оската на моторот е 86,5 kW. Под истите услови се вршени и соодветните мерења. Исто така е претпоставена идеална центрифугална карактеристика ($M_S = kn^2$).

Под дадените услови се пресметани карактеристиките на пуштање на погонот. На Слика 4 е прикажана промената на струјата на моторот при пуштање. Од неа се гледа причината за примена на овој начин на пуштање, бидејќи се намалува почетната струја, но сепак постои кусотраен струен удар при преклопувањето.



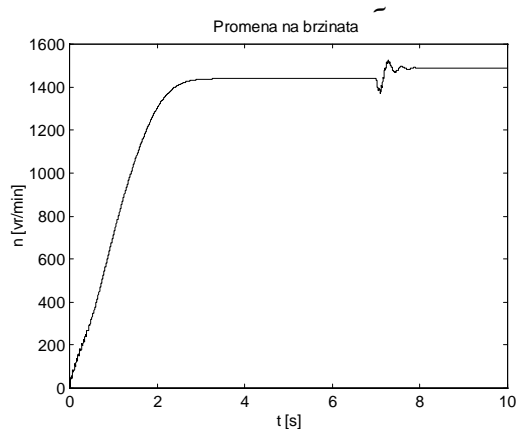
Слика 4 Промена на струјата при пуштање со преклопка ѕвезда-триаголник

Пресметаните промени на моментот на моторот и на брзината за време на пуштањето се прикажани на Слика 5 и Слика 6 соодветно. Од нив се гледа недостатокот на овој начин на пуштање, мал почетен момент и зголемено лизгање (со тоа и загревање) кога моторот работи во ѕвезда.



Слика 5 Промена на моментот при пуштање со преклопка ѕвезда-триаголник

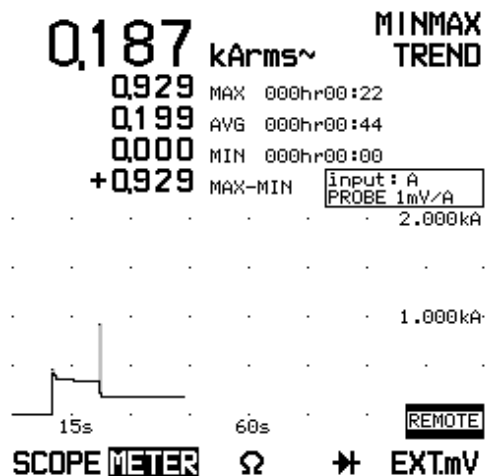
За да се изврши проверка на предложениот модел, дали тој одговара на стварноста измерена е промената на струјата за време на пуштањето, бидејќи со расположливата опрема



Слика 6 Промена на брзината при пуштање со преклопка звезда-триаголник

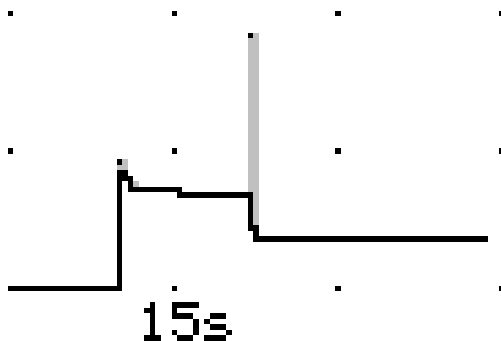
Мерењата се извршени со FLUKE SCOPEMETER 105. Тоа е преносен дигитален осцилоскоп со фреквенција од 100 MHz.

Струјата е мерена со струјна клешта тип FLUKE 600. Измерената линиска струја во METER мод за време на пуштањето е прикажана на Слика 7.



Слика 7 Измерената линиска струја при пуштање со преклопка звезда-триаголник

Очигледно е дека промената на мерената и пресметаната струја се со ист тек. Максималните вредности во двата случаја се различни, бидејќи SCOPEMETER 105 има мало време на семплирање во METER мод од една страна, а од друга страна дисплејот е со лоша резолуција (минимален можен приказ е 1 мин) Зголемениот приказ на промената на струјата е дадена на Слика 8.



Слика 8 Зголемен приказ на измерената струја

Измерената стационарна струја на моторот во триаголник изнесува 187 А. Пресметаната стационарна струја е 179 А, што дава грешка од -4.2 %. И ова покажува дека применетиот модел за определување на параметрите на моторот и применетиот динамички модел се многу блиски со реалноста

3. ЗАКЛУЧОК

Асинхроните кафезни мотори учествуваат со повеќе од 85 % од сите инсталирани наизменични погони. Брзиот развој на енергетската електроника и на системите за автоматска регулација придонесуваат за освојување на делот од пазарот каде е потребна регулација на брзината.

Определувањето на сите потребни отпорности за примена во регулираните погони може да се направи на повеќе начини. Најпогоден начин, посебно кај големите асинхрони кафезни мотори е употребата на каталожките податоци, бидејќи корисниците располагаат само со нив, од една страна и нема потреба од скапа експериментална опрема од друга.

Во овој труд е прикажан еден модел погоден за пресметка на параметрите на АКМ преку каталожки податоци и соодветните добиени резултати за мотор со моќност од 132 kW.

Со пресметаните параметри е развиен соодветен динамички модел на погонот. Како доказ за коректноста на моделите пресметаните вредности на статорската струја при пуштање со преклопка ѕвезда-триаголник се споредени со измерените вредности. Пресметаните и мерените вредности даваат многу блиски вредности што само ја потврдува коректноста во пристапот.

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1]Andonov Z., Mir~evski S., Simulation of induction motor electrical drive based on catalogue data parameter estimation, ACEMP'95, Kusadasi, Turkey, 1995, pp. 315-320.
- [2]Andonov Z., Mir~evski S., Catalogue data parameter estimation of induction motor electrical drive, Proceedings of PCIM'96, Nuremberg, Germany, 1996, pp. 593-604.
- [3]Андонов З., Моделирање на погон со асинхрон кафезен мотор преку каталожки податоци, магистерски труд, Електротехнички факултет, Скопје, 1998.
- [4]S. Ansuj, F. Shokooh, R. Schinzinger, Parameter Estimation for Induction Machines Based on Sensitivity Analysis, pp.1035-1040, IEEE trans. on Industry Application, vol.25, no.6 , 1989
- [5]J.R. Smith: Response analysis of AC. Electrical Machines, Research studies press, England, 1990.
- [6]V. Vu~kovi}: General theory of Electric machines, Nauka, Beograd, 1992. (on serbian)
- [7]B. Jurkovi}, D. Ban: General model for estimation of large squirrel cage induction motors unknown parameters, Energija br-7-8, 1981. (on croatian)

- [8]M.L. James, G.M. Smith, J.C. Wolford: Applied numerical methods for digital computation with FORTRAN and CSMP, IEP - A Dun-Donnelly Publisher, New York, 1977.
- [9]Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D., Analysis of electric machinery, IEEE Press, New York, USA, 1995.

МАКЕДОНСКИ КОМИТЕТ ЗА ГОЛЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМИ - СИГРЕ СКОПЈЕ;

ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО СИГРЕ

Горан Рафајловски
Електротехнички факултет Скопје

ВЕКТОРСКИ СИСТЕМИ И ИДНИ ТРЕНДОВИ ВО РЕГУЛАЦИЈАТА НА АСИНХРОНИТЕ МОТОРИ

РЕЗИМЕ

Во трудот е даден ревијален приказ на регулационите системи со асинхрони мотори: нивниот динамички развој, сегашната состојба, и идните трендови во регулацијата на електромоторните погони. Исто така се дискутирани основните карактеристики, перформанси и различните подрачја на примена на поедините регулациони концепти.

Во иднина се очекува се помасовна примена на самоадаптирачките регулациони системи, системи на референтно адаптивно управување, експертните системи на управување базирани на фази логиката и невронските мрежи скоро во сите типови на векторски управувани електромоторни погони.

ABSTRACT

This paper gives a comprehensive review of historical development of induction motor based control systems: their dynamic evaluation, present state, development and future trends in controlling of ASD (adjustable speed drives). Basic characteristics, performances and different application fields of particular induction motor based control concept are discussed.

It is expected the application of self-tuning controllers, model reference adaptive control systems, fuzzy and artificial neural network based controllers to have a dominant role in the future in all types of vector controlled drives.

1. ВОВЕД

Сегашната тенденција на брз развој во подрачјето на енергетската електроника и модерните високо интегрирани електронички елементи за обработка на сигналите, овозможуваат се повеќе погонски состојби во индустријата да се решаваат со примена на машините на наизменична струја. Тука, пред се, значајно место заземаат асинхроните мотори, особено изведбите со кафезен ротор.

Широкиот публицитет кој во последниве неколку години го имаат векторски регулираните електромоторни погони може да доведе до погрешен заклучок дека во светот денес голем процент од искористливите електромоторни погони се регулирани ЕМП. Светските статистики покажуваат дека нпр. во Велика Британија во 1995 година само 4% од моторите имаат придружен регулационен уред а во

подрачјето под 3kW тој процент е уште помал и изнесува 3%. Според други светски статистички показатели познато е дека 80% од целокупната енергија која ја трошат електромоторните погони отпаѓа на моќности под 4 kW. Според ова, ако цените на фреквентните, односно векторски базирани регулациони уреди почнат значително да опаѓаат, а регулационите перформанси и можности им се зголемуваат, тогаш реално е во блиска иднина да се очекува нивна се помасовна примена. Сигурно дека намалувањето на цената на регулациониот уред би претставувало значителна добивка во однос на цената на моторот, особено ако се постигне и значително штедење на енергија, намалување на другите додатни трошоци, па следователно времето на враќање на вложените средства за регулациониот уред може да се намали на само неколку години.

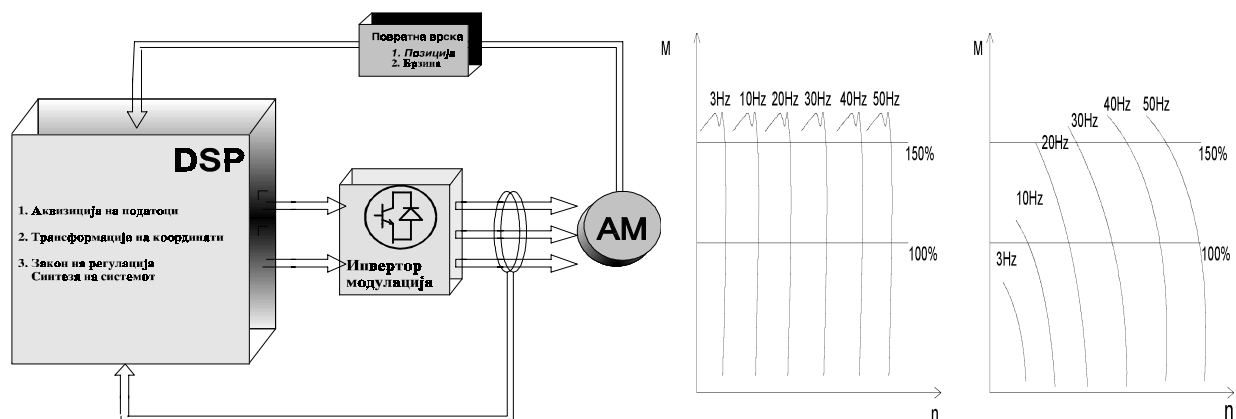
Уште во почетокот на 1992 година, една од најголемите светски фирми во областа на електроиндустријата - SIEMENS, започнува со многу интензивни теоретски и прототипни истражувања за примена на инверторски напојуван асинхрон мотор, во конструкција на електрично возило. Се прават обиди за примена на специфична варијанта на директна векторска регулација на флуксот и моментот.

Водечките инженери од корпорацијата HITACHI веруваат дека во најскора иднина ќе се отвори голем пазар за регулирани ЕМП со лансирањето на нивната нова серија на претворувачи од само неколку десетици фунти. Таквите регулатори ќе бидат толку ефтини што ќе се вградуваат во скоро сите домашни апарати за широка потрошувачка. Со тоа се предвидува дека овие модуларни инвертори за моќности над 100W тотално ќе го револуционизираат управувањето со моторите. Несомнено дека оваа техника ќе доведе до значителни предности, но исто така при несоодветни решенија, таа може да го зголеми и потенцијалниот проблем на лошо хармонично влијание на мрежата (изобличување на напонот, дополнителна реактивна енергија и сл.). Така прописите за електромагнетна подносливост (Electromagnetic Compatibility) ќе мора да бидат построги, како би се намалиле проблемите со квалитетот на напонот.

Но сепак се чини дека познатата светска фирма АВВ е отидена најдалеку. Во лондонскиот музеј на наука и техника при крајот на 1994 година, претставници на АВВ во главни црти ја прикажуваат теоријата на директната векторска регулација на моментот и флуксот на асинхрон мотор со кафезен ротор, но без прототипен модел за демонстрација. Истакнуваат дека директната регулација на моментот преставува најрадикално достигнување во областа на векторската регулација во последниве десет години. Претставената техника е резултат на развојниот програм започнат во Финска 1988 год. во кој биле уклучени повеќе од 100 инженери на година [19]. Сепак првиот производ на преобразувач на фреквенција и напон базиран на директната векторска регулација на моментот и флуксот, се јавува во септември 1995 година [19], [21]. Во фирмата АВВ тврдат дека преобразувачите со директна регулација на моментот ќе можат да заменат 95% од примената на сите електромоторни погони во индустријата. Според податоците на АВВ преобразувачите со директна регулација на моментот ќе се применуваат за регулирани електромоторни погони во дијапазон на моќности од неколку киловати до неколку мегавати, и ќе преставуваат единствена база за сите идни АВВ-електромоторни погони.

2. ВЕКТОРСКИ СИСТЕМИ

На сл.1 прикажана е принципиелна блоковска структура на еден систем за векторска регулација. Регулациониот систем принципиелно се дели во три целини. Една од нив го претставува објектот на регулација, односно динамичкиот нелинеарен и мултиваријабилен математички модел на асинхрониот мотор. Втората целина е инверторот, односно неговиот дискретен математички модел со варијабилна структура, и третата целина ја претставува DSP (Digital Signal Processor) кој треба да ја врши функцијата на целокупна регулација на затворениот систем на регулација. Во него се имплементираат управувачките алгоритми, аквизицијата и естимацијата на валидните податоци, трансформација на координатите, како и алгоритмите на синтеза на регулационите кола.



Сл.1 Принципиелна блоковска структура Сл.2 Механичките карактеристики на АМ

Во последно време во подрачјето на управување со АМ се повеќе и поинтензивно се врши замена на скаларната U/f регулација со векторската регулација која осигурува повисоки динамички перформанси на погонот. На сл.2 дадени се механичките карактеристики на асинхрон мотор, од фирмата *esco* (коорпорација на Eugen Schmidt и Hitachi), добиени при векторска- и U/f - регулација како илустрација на предностите на методот на векторска регулација особено при мали брзини. Повеќето светски производители на ваква опрема како главни недостатоци на U/f - или скаларната регулација ги истакнуваат ограничувањата со динамиката на одзивите (карактеристиките им варираат со промена на работниот режим), со екстремно малиот број на вртежи како и со можноста за висока динамика на регулација на моментот. Како главни причини за овие недостатоци на U/f -регулацијата секако се нелинеарниот модел на асинхроната машина и придружниот ефект на спрега меѓу d - и q -оските на машината.

Според тоа, векторската регулација е метод за динамичка регулација на брзината и моментот на асинхрониот мотор преку постојана регулација на интензитетот и аголот на просторните вектори на електромагнетните величини. Една од најважните придобивки на оваа регулација е штедењето на енергија, бидејќи векторската регулација овозможува динамичка регулација на факторот на моќност. Според тоа впечатлива е општата тенденција на високоразвиените земји во светот да ја прифатат векторската регулација како универзален метод при регулирање на наизменичните електромоторни погони.

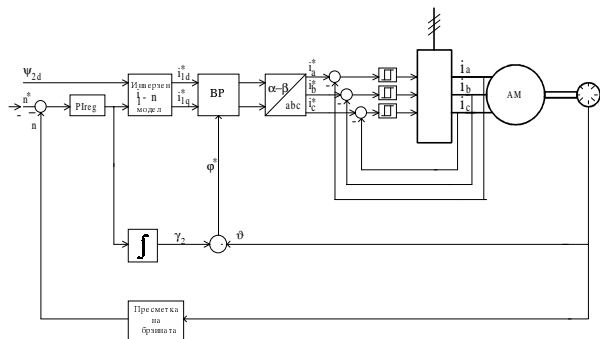
Во основа се разликуваат две техники на векторско управување: директна и индиректна метода. Индиректната метода го ползува математичкиот модел на асинхронниот мотор, односно за регулација ориентирана на роторскиот флукс ја користи соодветната релација за лизгањето и е многу зависна од промената на параметрите на машината. Директната метода се базира на директно мерење или естимација на просторните вектори на статорскиот или роторскиот флукс.

Основна, заедничка карактеристика на сите пристапи кон различните типови на векторска регулација претставува динамичката еквивалентна шема на асинхронната машина со чија помош се врши трансформирање или приближување на динамичката нелинеарна структура на асинхронниот мотор до моделот на еднонасочен мотор со независна возбуда. Како резултат се добива можноста за четириквadranten режим на работа на асинхронниот мотор со брз одзив и динамика на моментот, како и добри перформанси на погонот до брзини нула.

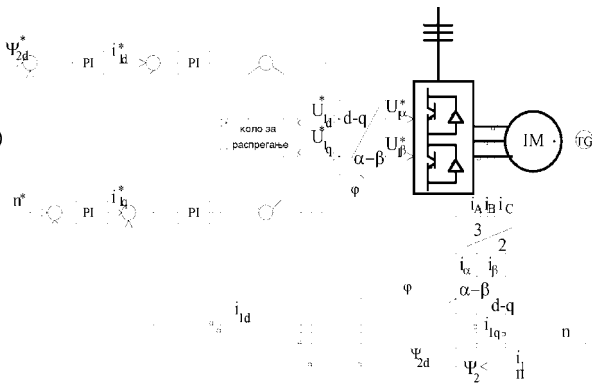
Со цел да се обезбеди што е можно подобра динамика на целокупниот систем во широк дијапазон на брзина и оптоварување досега практична примена наоѓаат два динамички модела на асинхронниот мотор во зависност од тоа дали регулацијата е ориентирана на векторите на статорската струја и роторскиот флукс или пак на векторите на статорскиот и роторскиот флукс. Системот на векторска регулација кој е ориентиран на векторот на роторскиот флукс наменет е претежно за електромоторни погони во влечни апликации и покажува релативно висока сензибилност со варијабилноста на параметрите на машината. Системот на векторската регулација на асинхронниот мотор во статорски координатен систем ориентиран на векторот на статорскиот флукс и прекинувачкиот режим на работа на инверторот наменет е скоро исклучиво за серво апликации. Едноставноста, робусноста и доверливоста на овој релативно понов регулационен пристап отвораат широки перспективи и нови можности во векторската регулација на серво системите со асинхрони мотори.

2.1 Индиректни системи за векторска регулација

Индиректните методи на векторска регулација со ориентација на полето не вршат естимација или мерење на просторниот вектор на роторскиот флукс, туку ја користат релацијата за лизгањето за пресметка на излезните сигнали на просторниот вектор на статорската струја (при векторска регулација со струен инвертор), односно излезните сигнали на просторниот вектор на статорскиот напон (при векторска регулација со напонски инвертор). За да се намали зависноста на параметрите на машината од загревањето или пак заситувањето се користат изведби во различни координатни системи. Исто така се развиени бројни шеми за адаптација на параметрите. Како техники кои се употребуваат познати се самоадаптирачките регулациони системи (selftuning systems STS), системи на робусно управување, системи на референтно адаптивно управување (model reference adaptive control MRAC) итн. На сл.3 прикажана е принципиелна шема на систем за индиректна векторска регулација. Слични варијанти на индиректни шеми за векторска регулација се анализирани од Flugel, Zägelein и Hasse [11], [13].



Сл.3 Индиректна векторска регулација



Сл.4 директна векторска регулација

2.2 Директни системи за векторска регулација

За разлика од индиректните системи на векторска регулација директниот систем (сл.4) се базира на мерење, аквизиција и (или) естимација на просторниот вектор на роторскиот флукс. За да се избегнат проблемите со аквизиција на роторскиот флукс општа тенденција во поново време е да се напушти пристапот на мерење на флуксот со помош на дополнително вградени намотки или пак Халови сонди, а да се врши прифаќање на флуксот со помош на соодветно за таа цел адаптирани математички модели [13]. Мерењето на роторскиот флукс ги има во главно тие недостатоци што е сврзано со губење на едноставноста на машината поради вградување на соодветни мерни елементи во текот на конструкција на машината и со додатни трошоци за придружна опрема за обработка на мерните сигнали [10], [11], со што се зголемува цената и се намалува потребата за примена на вакви регулирани погони. Аквизицијата на роторскиот флукс со помош на модели го има недостатокот врзан со чувствителноста на параметрите од загревањето, што е во тесна врска со погонската состојба на моторот. Во таа смисла вршени се долготрајни истражувања и разработени се повеќе модели во различни координатни системи за аквизиција на роторскиот флукс, како и квалитативно - квантитативната оценка и компензација на грешката заради температурната и магнетната променливост на параметрите.

2.3 Системи за директна регулација на моментот

Согласно со потребите за се поголема автоматизација на производните процеси серво системите погонувани во најчест случај од асинхрони мотори стануваат се повеќе неопходни за различни апликации како во подрачјето на роботиката така и во подрачјето на нумерички контролираните машини алатки. Во последниве години, особено во високо развиените индустриски земји, се забележува многу интензивен развој на различни концепти на регулација на АМ со ориентација на полето (Field-oriented control), со што во регулациона смисла се овозможува приближување на асинхрониот момент до еднонасочниот мотор. За разлика од регулациониот систем кој е ориентиран на просторниот вектор на роторскиот флукс, на динамичкиот модел во d-q координатен систем на АМ и на импулсно широчинската модулација на напонскиот инвертор, а притоа користи линеарна регулациона техника и линеарни регулатори, системите за директна регулација на моментот (Direct torque control systems) имаат поинаков концепт на векторска

регулација. Овие системи се базираат на просторниот вектор на статорскиот флуks, на моделот на асинхронниот мотор во стационарен координатен систем и на просторно векторската модулација на инверторот [7], [8], [9], [18], [19], [20]. Притоа овој концепт користи и нелинеарни регулациони техники и нелинеарни регулатори.

Ориентацијата на регулациониот систем на просторниот вектор значително ја намалува зависноста на регулационата структура од температурните варијации на параметрите на еквивалентната шема на асинхронниот мотор. За разлика од регулационите системи на асинхрон мотор со ориентација на полето во кои прецизноста на естимацијата на просторниот вектор на роторскиот флуks е во директна зависност со параметрите на моторот кои ја определуваат роторската временска константа, во овој концепт на векторска регулација [20], [21], нема потреба од аквизиција на просторниот вектор на роторскиот флуks. Ориентацијата на регулационата структура на моделот на асинхронниот мотор во стационарен координатен систем ја избегнува потребата од трансформација на координатите на просторните вектори на машината кои влегуваат во анализата и синтезата на регулационите кругови [20].

Просторно векторската модулација овозможува максимално искористување на динамиката на инверторот, лесно и едноставно оптимизирање на фреквенцијата на вкл./искл. по однос на квалитетот на бараниот одзив на регулираните големини (флуks, брзина, момент и сл.), со што истовремено се намалуваат загубите на вкл./искл. на инверторот, загубите од вишите хармонични членови на напонот и струјата на напојување на машината како и бучавата. Асинхронниот мотор е нелинеарен систем од висок ред и за негова векторска регулација со помош на линеарни техники и регулатори неопходна е примената на комплицирани математички модели. Според тоа, поради комплексноста на нелинеарните диференцијални равенки, кои го опишуваат динамичкиот модел на асинхронниот мотор, процесирањето на сигналите на регулациониот систем, се усложнува. Од друга страна енергетскиот инвертор преставува исто така нелинеарен елемент, бидејќи е составен од 6 (шест) енергетски прекинувачи (склопки), кои се исто така нелинеарни елементи. Инверторот ја менува својата динамичка структура во зависност од тоа која склопка е вклучена односно исклучена, па може да се каже дека инверторот е нелинеарен елемент со променлива структура. Поради сето ова е природно и логично, да се употреби нелинеарен регулационски концепт и нелинеарни регулатори за директна регулација на инверторски напојувани асинхронни мотори [20], [24], [25], [26].

3. ПОНАТАМОШЕН РАЗВОЈ

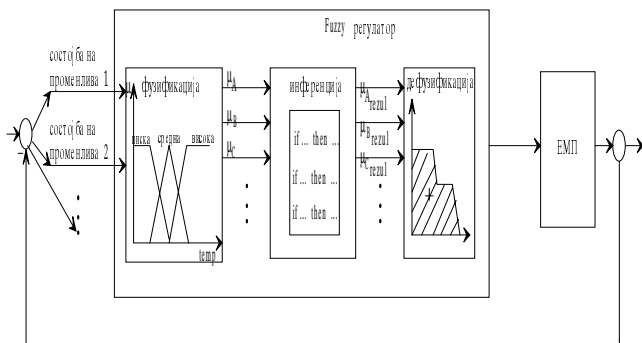
Појавата на енергетските тиристори на пазарот во 1960 те го обележуваат почетокот на т.н револуција во индустриската електроника. Интензивниот развој во последниве години на полупроводничките елементи (MOS-FET транзистори, IGBT, GTO тиристори, MOS тиристори), во подрачјето на енергетската електроника овозможуваат конструкција на се помоќни и поефтини инвертори. Познато е дека перформансите на полупроводничките елементиво добра мера ја определуваат големината, тежината и цената на регулираниот електромоторен погон.

Од друга страна оваа тенденција на брз развој во подрачјето на енергетската електроника е форсирана од модерните високо интегрирани електронички елементи за обработка на сигналите. За имплементација на управувачките алгоритми во реално време најчесто се користат моќните сигнал процесори: TMS

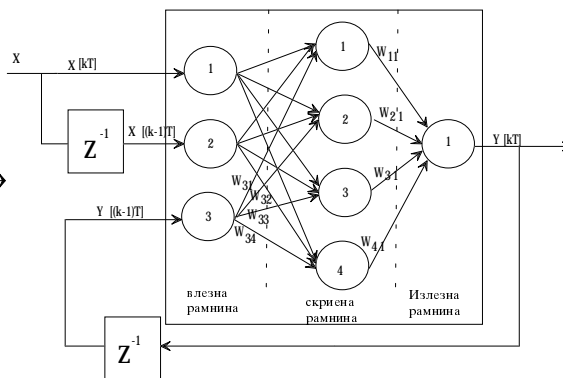
320C25DSP, TMS 320C30DSP, TMS 32010DSP, TMS 320E14DSP или AT&T DSP32C. Поради фактот дека комплексното процесирање на сигналите во најчест случај се реализира со релативно бавна програмска поддршка, а да се постигне забрзување на истото, во иднина се повеќе ќе се развиваат и применуваат специфични високоинтегрирани ASIC (application specific integrated circuit) чипови, за реализација на ИШМ (PWM) модулација, трансформацијата на координати и други сложени функции. Во иднина дури се очекува и целокупната регулација со енергетската електроника да се базира на еден единствен хибриден дигитален ASIC чип.

Исто така се очекува да продолжи трендот на истражување нови шеми за адаптација на параметрите на машината. Како техники кои се употребуваат познати се самоадаптирачките регулациони системи (selftuning systems STS), системи на робусно управување, системи на референтно адаптивно управување (MRAC). Во иднина се очекува уште поголема застапеност на дигиталната техника, односно микропроцесорско базираните управувачки системи. Исто така неминовен е забрзаниот пораст на примена на различните адаптивни методи како системите со променлива структура (variable structure system VSS), самоадаптирачки системи (STS), модели на робусно управување, модели на референтно адаптивно управување (MRAC), а во блиска иднина масовна примена на експертните системи на управување (expert system) базирани на fuzzy логиката, на генетските алгоритми (genetic algorithm) и на вештачките невронски мрежи (artificial neural network ANN).

Регулацијата базирана на *fuzzy логиката* побудува се поголем интерес во последниве неколку години особено во Јапонија, Германија, САД. Таа е многу поблиска до човечкото природно размислување и јазик отколку традиционалните регулациони техники [28]. Fuzzy логиката овозможува ефективна обработка и претстава на неегзактната природа на реалниот свет. Fuzzy логичките базирани регулациони системи овозможуваат едноставна, брза и ефикасна конверзија на лингвистичката регулациона стратегија, базирана на експертното знаење и наука во стратегија на автоматско управување. Искуството покажало дека fuzzy регулацијата може да оствари подобри резултати споредено со класичната регулација особено кога се применува на системи за управување во кои објектот на управување е опишан со комплексен и тежок математички апарат или пак воопшто не е можен негов егзактен математички приказ. Структурата на еден fuzzy логички контролер е дадена на сл.5.



Сл.5 Шематски блок дијаграм на систем со Fuzzy логички контролер



Сл.6 Принципиелна шема на PI регулатор реализиран со ANN

Од сл.5 следи дека fuzzy логички контролер ги содржи следниве три главни блока:

Фузификација (*Fuzzification*) претставува придружување на сет од логички термини (варијабли) за опишување на егзактните состојби на влезните променливи. Со овој влез се врши обопштување, односно се дава логичко толкување за величината односно состојбата на влезните променливи. За таа цел се користат математички оператори базирани на лингвистичката логика (и низа други искусвени правила) и се извршуваат следниве задачи:

- Придружување на соодветна лингвистичка варијабла на секоја влезна променлива,
- Определување на придружните функции,
- Отчитување на придружниот коефициент.

Фази инференција (*Fuzzy Inference*) претставува постапка на обработување на поимите на база на следниве правила во случај на една влезна променлива:

IF (*Премиса 1*) THEN (*Решение 1*)

или во случај на повеќе влез:

IF (*Премиса 1*) AND /OR /GAMMA (*Премиса 2*) AND /OR /GAMMA (*Премиса 3*) AND /OR /GAMMA (*Премиса 4*)..... THEN (*Решение*)

Со овој блок се извршуваат следниве задачи:

- Поставување правила за обработка најчесто базирани на искуство,
- Избор на оператор за AND / OR и други функции во случај на повеќе променливи,
- Пресметка на придружниот коефициент од резултатот (употреба на Min оператор, Max оператор, Product оператор Gamma оператор и сл.).

Дефузификација (*Defuzzification*) претставува постапка за претворување на една нејасна фузифицирана состојба во конкретни бројки и вредности и ги извршува следниве задачи:

- Поставување на метода за дефузификација. Како најзастапени во пракса се методите среден максимум (Mean of Maximum) и центар на гравитација (Center of Gravity),
- Отчитување на резултатите.

Регулацијата базирана на **вештачкиите невронски мрежи** (*Artificial Neural Network ANN*) најголема примена наоѓа при идентификација и регулација на нелинеарни системи. Вештачките невронски мрежи претставуваат нелинеарна адаптивна динамичка структура, која во себе содржи високо интерактивни процесирачки елементи наречени неврони. Нивната структура е базирана на невробилошката структура на човечкиот мозок. Веќе постојат и се развиваат повеќе модели на невронски мрежи но нивната основна карактеристика е способноста за обучување и адаптација што ги прави идеални за примена во системите за автоматско адаптивно управување. Регулаторот базиран на вештачките невронски мрежи може успешно да се примени дури и во случаи кога параметрите на моторот и товарот се непознати. За таа цел невронските мрежи прво ја идентификуваат непознатата динамика на системот, а потоа вака тренираната невронска мрежа може да се комбинира со референтен модел како би се постигнала бараната точност на регулација. За да се постигне попрецизна идентификација на системот, ANN се поставува паралелно со непознатиот регулиран систем (пример мотор+ товар). Најприменувана метода за нагодување на тежинските фактори на АНН е тн. Backpropagation постапка. На сл.6 прикажана е принципиелна шема на PI регулатор реализиран со ANN со три рамнини влезна (input layer), скриена (hidden layer) и излезна (output layer), на база на Backpropagation

постапка. Една невронска мрежа се состои од јазли неврони (neuron) меѓусебе поврзани преку врски дефинирани со тн. тежински фактори (weighting factors) и организирани во повеќе рамнини (Layers) и ги има следниве карактеристики:

- Невронот може да има две состојби на мирување и на возбуда,
- Невронот може да поседува повеќе влеза и само еден излез,
- Излезот од невронот се поврзува со други неврони или со надворешниот систем,
- Невронот преминува во состојба на возбуда кога доволен број од неговите влезови преку тежинските фактори се побудени односно активирани.

4. ЗАКЛУЧОК И ПЕРСПЕКТИВИ

Идните трендови во областа на енергетските преобразувачи ќе се одвиваат на полето на конструкција на интелигентни модули (smart power modules) кои во себе ќе вклучуваат заштита, вградени драјвери, сигнализација и евентуално нивно вградување во рамките на мотор со помали моќности со што би се добил тн електронички мотор (electronic motor). Доминантни полупроводнички вентили ќе бидат IGBT транзистори и МСТ тиристоры. Исто така се очекува континуитет во потрагата по нови материјали кои ќе ја комбинираат термичката проводност, електричната изолација и механичката цврстина.

Во областа на управувањето се очекува продолжување и интензивирање на примената на различните адаптивни методи како системите со променлива структура (variable structure system VSS), самоадаптирачки системи (selftuning systems STS), модели на робусно управување, модели на референтно адаптивно управување (model reference adaptive control MRAC), експертните системи на управување (expert system) базирани на fuzzy логиката, на генетските алгоритми (genetic algorithm) и на вештачките невронски мрежи (artificial neural network ANN). Во таа смисла тука е даден преглед на некои основни карактеристики и можности на регулациони системи базирана на *вештачките невронски мрежи (Artificial Neural Network ANN)*, како и еден описан шематски блок дијаграм на еден систем со fuzzy логички контролер. Во иднина се очекува поголем избор на DSP софтверски алатки, со што значително ќе се зголеми примената на DSP векторски контролирани електромоторни погони. Во Р. Македонија, со заздравување на стопанството, и со нови инвестициони вложувања во индустријата, природно е да се очекува поинтензивно следење на модерните светски токови во индустријата, а тоа значи интензивирање на примената на векторски регулираните електромоторни погони.

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Baader U., Depenbrock M., Gierce G.: Direct self control of inverter fed induction machine A basiss of speed control without speed measurment, IAS Ann. Mtg., San Diego, 1989
2. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvector-Regelung von Drehfeldmaschinen, Siemens Zeitschrift 45 H.10 757-760, 1971
3. Blaschke F.: Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Drehfeldmaschine, Diss. TU Braunschweig 1974
4. Boglietti A., Griva G., Pastorelli M., Profumo F.: Different PWM Modulation Techniques Indexes Performance Evaluation, IEEE and ISIE Conference, Budapest 1993 Hungary
5. Bose B. K.: Introduction to AC-Drives. Adjustable speed AC-Drive system, John Wiley and Sons, New York, 1980

6. Bose B. K.: Technology trends in microcomputer control of electrical machines, IEEE Trans. Ind. Electr., Vol. 35, No1, 1988.
7. Depenbrock M.: Directe Selbstregelung (DSR) für hochdynamische Drehfeldantriebe mit Stromrichterspeisung, etz Archiv Bd.7, 1985, H7 s211-218
8. Depenbrock M.: Direct self control (DSC) of inverter fed induction machine, IEEE Power Electronics Specialists Conference 1987 pp.632-641
9. Dote Y.: Application of modern Control Techiques to motor control, Proceedings of the IEEE, Vol.76, No.4, 1988
10. Flöter W., Ripperger H.: Die TRANSVECTOR - Regelung für den feldorientirten Betrieb einer Asynchronmaschine, Siemens Zeitschrift 45 1971, s. 761-764
11. Flügel W.: Drehzahlregelung umrichtergerespeister Asynchronmaschinen bei Steuerungen des Flußes durch Entkopplungsnetzweke, Diss. TU Munchen 1981
12. Gabriel R., Leonhard W., Nordby C. T.: Field oriented control of a standard AC Motor using microprocessors, IEEE Trans on Ind. Appl. Vol.IA-16, 1980, p.186-192
13. Hasse K.: Zur Dynamikdrehzahlgeregelter Antriebe mit stromrichtergespeisten Asynchronkurzschlusslaufermaschinen, Diss TH Darmstadt, 1979
14. Harashima Fumio, Kondo Seiji, Ohnishi Kouhei, Kajita Masabschi, Susono Motonisa: Multimicroprocessor based control system for quick responce induction motor drive IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.IA-21, No.4, 1985
15. Isosimov D. B., Utkin U. I. Sliding mode control of electric motors, 8th IFAC World Congr., Kyoto, Japan, 1981
16. Jänecke M., Kremer R., Steurwald G.: Direct self control (DSC) a novel method of controlling Asynchronous machines in traction applications, EPE Aachen 1989
17. Jotten R., Mader G.: Control methods for good dynamic performance induction motor drives based on current and voltage as measured quantities, IEEE Trans. on Ind. Appl. 1983 No.3 pp.356-363
18. Kazmierkowski M, Kasprovicz B. Andrzej: Improved Direct Torque and Flux Vector Control of PWM Inverter- Fed Induction Motor Drives, IEEE Trans. on Ind. electr. Vol.42, No.4, August 1995, pp 344-349
19. Mika Aaltonen, Pekka Tiltinen, Jarkko Lalu, Samull Helkkliä ABB Industry Oy: Direct torque control of AC motor drives, ABB Review 3/1995, pp 19-24.
20. Рафајловси Горан: Моделирање и истражување на системи за векторско управување на асинхрони мотори, Докторска дисертација, Скопје 1995
21. Rajkovic Borivoje: Tendencije u razvoju elektromotornih pogona s asinhronim motorima, AUTOMATIKA 36(1995) 1-2, pp 11-17,
22. Schönfeld Rolf, Habiger Ernst: Automatisierte Electroantriebe, VEB Verlag Technik, Berlin 1990
23. Schönfeld Rolf: Digitale Regelung elektrischer Antriebe, Verlag Technik GmbH, BERLIN 1990
24. Segerer H.: Direct control of induction motors. A time discrete strategy respecting time continuous traectories, EPE Firenze, 1991, pp. 412-420
25. Takahaschi I., Kanmachi T.: Ultra wide speed control with a quick torque responce AC Servo by a DSP, EPE Firenze, 1991, pp.312-320.
26. Takahaschi I., Moschikava A.: A new quick responce and high efficiency control strategy of an induction motor, IEEE-IAS Annual Meeting, Toronto 1985 pp.496-502
27. Vas Peter: Vector control of AC machines, Clarendon Press - Oxford, 1990
28. Vas P., Drury W.: Vector controlled drives, Intelligent Motion, Juni 1994, pp 214-228

д-р Слободан Мирчевски
м-р Здравко Андонов
Електротехнички факултет - Скопје

КОМПЕНЗАЦИЈА НА РЕАКТИВНА МОЌНОСТ ВО ЕЛЕКТРОМОТОРНИТЕ ПОГОНИ

СОДРЖИНА

Електромоторните погони се најголеми потрошувачи на реактивна моќност во индустријата. Потребата од реактивна моќност придонесува за полошо искористување на енергетскиот систем, а со тоа и до поскапување на електричната енергија. Во трудот е направена анализа на најзначајните потрошувачи на реактивна енергија. Од анализата на потрошувачите на реактивна моќност се изведени и можностите за подобрување на факторот на моќност. Анализирани се можностите за подобрување на факторот на моќност без компензирачки уреди и најчесто користените компензирачки уреди.

ABSTRACT

Electric drives are the greatest reactive power consumers in the industry. Needs of reactive power reduce power system efficiency and increase costs for electrical energy. In this paper the analysis of the most important reactive power consumers is made. From the analysis of the reactive power consumers the power factor improvement possibilities are developed. The power factor improvement possibilities without VAr compensator and the most frequently used VAr compensator are analysed.

1. ВОВЕД

Електромоторите, енергетските преобразувачи, електричните водови од мрежата, трансформаторите и други потрошувачи имаат потреба од реактивна моќност, која може да ја земаат од мрежата или од кондензаторски батерии за компензација. Режимот на реактивните оптоварувања во значителна мера влијае врз квалитетот на напонот, загубите на моќност и енергија, па според тоа и на цената на електричната енергија.

Со компензацијата се овозможува растоварување на генераторите, трансформаторите и водовите, односно значително се намалуваат трошоците за електрична енергија. Електростопанството мора да наоѓа стимулативни мерки за потрошувачите на реактивна моќност. Според денес важечкиот тарифен правилник потрошувачите ја плаќаат потрошената реактивна енергија само ако $\cos \varphi < 0,95$.

Во развиените земји граничниот фактор на моќност се зголемува на $\cos \phi = 0,97$. Прекумерната компензација ги зголемува трошоците, предизвикува дополнително капацитивно оптоварување на водовите и несакани зголемувања на напонот.

Асинхроните мотори претставуваат најголеми потрошувачи на реактивна моќност. Енергетските преобразувачи, кои стануваат се поприсутни кај наизменичните регулирани електромоторни погони, исто така стануваат се позначајни потрошувачи на реактивна моќност. Трансформаторите кои се присутни и кај нерегулираните и кај регулираните електромоторни погони со поголеми моќности, исто така имаат битно учество во потрошувачката на реактивна моќност. Затоа во електромоторните погони со асинхрони мотори мора да се води сметка за компензацијата на реактивна моќност. Ако се работи за регулиран погон со примена на електронски енергетски преобразувач треба уште да се земе предвид присуството на виши хармоници, односно кондензаторската батерија е составен дел на филтерот со кој треба да се елиминираат некои од хармониците.

Најдобро е факторот на моќност да се подобри природно, без компензирачки уреди. Меѓутоа, ова главно се постигнува во фазата на проектирање со правилен избор на електромоторот и режимот на работа на погонот.

Компензирачките уреди во електромоторните погони може да се поделат на статички и динамички. Статички компензирачки уреди се енергетските кондензатори, реактори и тиристорски управувани кондензатори и реактори, кои уште се нарекуваат статички извори на реактивна моќност. Динамички компензирачки уреди се синхроните машини, компензирачки прекинувачки преобразувачи и др. Денес најчесто употребувани компензирачки уреди во електромоторните погони се кондензаторските батерии и синхроните мотори. Се почесто се применуваат и тиристорските компензирачките уреди.

Кај современите регулирани електромоторни погони поправката на факторот на моќност мора да се разгледува заедно со елиминирањето на вишите хармоници. За решавање на наведените прашања неопходно е да се создадат стимулативни прописи, при што главно влијание има тарифниот правилник.

2. ПОТРЕБИ ОД РЕАКТИВНА МОЌНОСТ ВО ЕМП

Во електроенергетскиот систем е неопходно да се внесува реактивна моќност преку разни компензирачки уреди. Како критериум за присуството на компензирачки уреди во ЕЕС се зема факторот v кој претставува однос на инсталираната компензирачка моќност и максималната активна моќност на потрошувачот. На пр., во Јапонија овој фактор изнесува 1 kVAr/kW , во САД $0,6 \text{ kVAr/kW}$, во бившиот СССР $0,4 \text{ kVAr/kW}$ (за 1985 година), а во Бугарија $0,15 \text{ kVAr/kW}$, [2].

Табела. 1 Потрошувачи на активна и реактивна моќност во индустријата

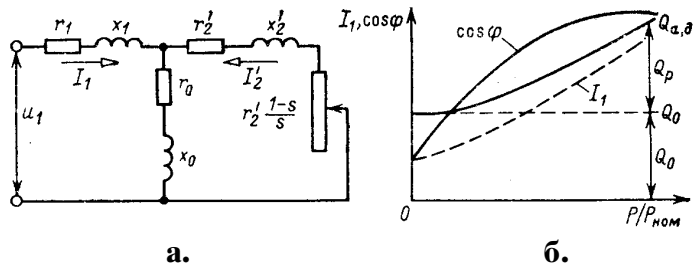
| Вид на потрошувачот | P % | Q % |
|---------------------------------|-----|-----|
| Асинхрони мотори | 30 | 33 |
| Синхрони мотори | 23 | 0 |
| Енергетски преобразувачи | 18 | 10 |
| Електротермиски уреди | 12 | 8 |
| Услужни дејности | 7 | 5 |
| Сопствени потреби за централата | 5 | 2 |

За анализа на потребите на реактивна моќност во индустриските претпријатија треба да се располага со резултати од мерења при максимално оптоварување за најоптоварен дневен дијаграм во зимски период. Во табелата I е дадено учеството на потрошувачите на активна и реактивна моќност според [3].

2.1 Потребни на реактивна енергија во погоните со асинхронни мотори

Електромоторните погони се најголеми потрошувачи и на активна и на реактивна моќност. Работата на електричните машини за наизменична струја, која се заснива врз принципот на електромагнетска индукција, се остварува со процесот на непрекинатата промена на магнетниот флуks во нивните магнетни кола и растурни полиња. Затоа моќноста која им е потребна мора да содржи и индуктивна компонента Q_L , неопходна за создавање на магнетните полиња.

Реактивната моќност која им е потребна на трифазните асинхронни мотори може да се определи од еквивалентната шема претставена на слика 1.а.



Слика 1. Еквивалентна шема (а) и работни карактеристики (б) на асинхрон мотор

Реактивната моќност на куса врска Q_r расте пропорционално со квадратот на оптоварувањето, а на празен од Q_0 не зависи од оптоварувањето. Обично при номинално оптоварување Q_0 и Q_r се еднакви, како што е прикажано на слика 1.б.

Факторот на моќност $\cos \varphi$ во функција од активната моќност P_{am} изнесува:

$$\cos \varphi_{am} = \frac{P_{am}}{\sqrt{P_{am}^2 + Q_{am}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{am}}{P_{am}}\right)^2}} \quad 1$$

што е прикажано и на слика 1.б. При намалување на активното оптоварување на асинхронниот мотор се намалува и неговата реактивна моќност, но факторот на моќност се намалува многу побрзо и при празен ($k_t=0$) има многу мала вредност. Треба да се забележи дека овде насекаде станува збор за основниот фактор на моќност, без земање во предвид на вишите хармоници.

2.2 Потребни на реактивна енергија кај трансформаторите

Реактивната моќност потребна за трифазните енергетски трансформатори се распределува за магнетизирање на магнетното коло на трансформаторот Q_0 и на создавање на растурните полиња Q_r . Како што е познато, пресметката на овие компоненти се изведува по истите равенки како за асинхронниот мотор. Но, поради отсуството на воздушен зјај кај трансформаторот, неговата моќност на магнетизирање изнесува $Q_0=2-5\%$ од номиналната моќност на трансформаторот.

Со зголемување оптоварувањето за 10% се зголемува и $\cos \varphi$ за 0,04-0,05.

За тринамотајни трансформатори вкупните загуби се пресметуваат земајќи ги во предвид μ_k и k_t посебно за секоја намотка. Потребите од реактивна моќност кај

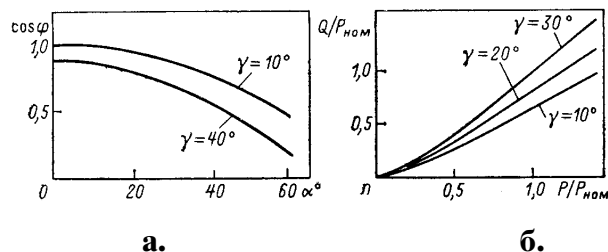
трансформаторите е неколку пати помала отколку кај асинхроните мотори, но вкупните потреби во системот се приближно исти (35% и 40% според Т.1). Тоа е условено со бројот на трансформации на напонот во системот кој изнесува 3-4 и има тенденција да порасне на 5-6. Затоа вкупната моќност на трансформаторите е за неколку пати поголема отколку на асинхроните мотори.

2.3 Потребите на реактивна енергија кај полупроводнички енергетски преобразувачи

Потребите за реактивна моќност кај полупроводничките енергетски преобразувачи произлегуваат од две причини: природниот комутационен процес помеѓу вентилите и вештачкото задржување на проведување на вентилот. Ова предизвикува поместување на струјата во однос на напонот во колата на вентилите, со што се намалува факторот на моќност во мрежата од која се напојуваат преобразувачите и се зголемуваат потребите за реактивна моќност. Наведените проблеми се поизразени кај преобразувачите со импулсно широчинско управување во споредба со преобразувачите со фазно управување.

При работата на трифазен насочувач, преминот на струјата од една фаза кон другата фазата не се случува во моментот кога се еднакви напоните, туку за тоа е потребно некое време на комутација, кое зависи од аголот на комутација γ . Поради процесот на комутација доаѓа до доцнење на струјата во однос на напон, со што се определува и потребата од реактивна моќност. Аголот на комутација зависи од индуктивниот отпор на колото.

Кај управуваните вентили се воведува задршка на вклучување со цел да се намали вредноста на исправениот напон. При тоа се јавува поместување на анодната струја во однос на промената на напонот за агол на палење на тиристорите α . Аголот на изместување на струјата по фаза (средниот импулс на струјата) во однос на амплитудата на напонот зависи од аголот на палење и аголот на комутација. На сл. 2 е прикажана промената на $\cos\varphi$ во зависност од аглите на палење и комутација.



Слика 2. Промена на $\cos\varphi$ во зависност од аглите на палење α и комутација γ .

Дополнително влошување на факторот на моќност предизвикува и фактот дека со исправувањето струјата ја губи својата синусоидална форма, што значи дека се јавуваат виши хармоници.

3. МОЖНОСТИ ЗА ПОДОБРУВАЊЕ НА ФАКТОРОТ НА МОЌНОСТ БЕЗ КОМПЕНЗИРАЧКИ УРЕД

Подобрување на факторот на моќност без уреди за компензација може да се реализира на следните начини:

1. Со правилен избор на електричната мрежа при нејзиното проектирање, со земање во предвид на режимот на работните машини. На пример, факторот на моќност зависи од правилниот избор на моќноста, брзината на вртење и димензиите на електромоторите, од правилниот избор на трансформаторите и т.н.

2. Подредувањање на технолошкиот процес во поглед на подобрување на енергетскиот режим на мрежата. Како резултат на тоа се постигнува порамнување на товарниот график, подобрување на факторот на моќност, подобро искористување на мрежата и намалување на загубите.

3. Користење на синхрони мотори наместо асинхрони со иста моќност, кога технолошкиот процес тоа го дозволува и е економски оправдано. Синхроните мотори можат да работат со $\cos\varphi=1$ или со капацитивен $\cos\varphi$, со што се намалува потребата од реактивна моќност.

4. Замена на помалку оптоварените мотори со мотори со помала моќност. Вредноста на $\cos\varphi$ зависи од оптоварувањето P . При празен од, факторот на моќност е 0,15-0,30, додека при номинално оптоварување се движи помеѓу 0,7 и 0,9. При намалување на оптоварувањето $\cos\varphi$ се влошува, додека реактивната моќност малку се менува. Во праксата асинхроните мотори работат со моќност помала од номиналната, па и факторот на моќност во фабриките е мал.

Во праксата се покажува дека: за $P \leq 0,45 P_n$ замената на моторот со помал е целисходна; $P \geq 0,70 P_n$ замената не е оправдана, а ако $0,45 P_n < P < 0,70 P_n$ се потребни дополнителни пресметки за рентабилноста на замената.

5. Намалување на напонот. Со намалување на доведениот напон се зголемува факторот на моќност на моторот, но тоа предизвикува и намалување на моментот на моторот ($M_m=cU^2$). Поради тоа намалувањето на напонот може да се примени само кај подоптоварени мотори, кои имаат таков интервал во работниот циклус.

Намалувањето на напонот може да се изведе на повеќе начини. Кога оптоварувањето на моторот е 0,4-0,5 P_n , целисходно е превклучување на намотката од триаголник во звезда. Во случаи кога во технолошкиот процес моторите работат со намалена моќност, можна е употреба на специјални асинхрони мотори со статорска намотка изведена со повеќе отцепи или напојување со променлив напон со енергетски преобразувачи.

6. Ограничување на работа во празен од на асинхроните мотори. Факторот на моќност на асинхроните мотори во празен од се движи од 0,15 до 0,30, што условува значително оптоварување на мрежата со реактивна моќност. Кога моторот работи во празен од подолго од 10 s е препорачливо исклучување на погонот.

7. Квалитетно премотување на моторите. Зголемувањето на воздушниот зјај на асинхроните мотори е проследено со зголемување на струјата на магнетизирање (струјата на празен од), со што се намалува $\cos\varphi$. Зголемувањето на воздушниот зјај се должи на зголемени вибрации, триење на роторот и статорот поради оштетени лежишта, некавалитетен механички ремонт и тн. За да се избегне зголемувањето на воздушниот зјај треба да се следат вибрациите, да се врши правовремено балансирање на роторот, да се користат квалитетни лежишта кои редовно ќе се одржуваат и тн. При премотување на моторот не треба да се дозволи намалување (промена) на бројот на навивките, бидејќи и тоа води кон влошување на $\cos\varphi$.

8. Намалување на потрошената реактивна енергија на трансформаторите може да се изведе со исклучување на неоптоварените трансформатори и со замена на подоптоварените трансформатори. Замената на трансформаторите е целисходна во случај кога факторот на оптоварување е помал од 0,6, додека за останатите

случаи е потребна дополнителна техничко економска пресметка на оправданоста на зафатот.

4. НАЧИНИ ЗА КОМПЕНЗАЦИЈА НА РЕАКТИВНА МОЌНОСТ ВО ЕМП

4.1 Синхрони машини

При компензација на реактивна моќност во електромоторните погони можна е примена на три вида синхрони машини: синхрони компензатори; синхрони мотори и синхрони генератори.

Примената на синхроните машини за компензација на реактивната моќност е можна, бидејќи со зголемување на возбудната струја синхроната машина може да произведува реактивна енергија која може континуирано да се менува.

Синхроните компензатори се предвидени за работа без оптоварување на осовината, а се користат исклучиво како уреди за компензација на реактивна енергија. Нивната примена е ограничена со релативно високата цена, а вообичено се применуваат од страна на електростопансто.

Примената на синхроните генератори како уреди за компензација е ограничена само на фирмите кои имаат сопствен генератор на електрична енергија.

Најчесто за компензација на реактивната енергија се користат електромоторните погони со синхрони мотори. Тоа е условено со тоа што производството на реактивна енергија претставува нуспродукт при извршувањето на основна задача. Цената на синхрониот мотор е условена со неговата привидна моќност, така да зголемувањето на компензационите својства на моторот е условено со зголемување на цената, но добивките се многу поголеми во однос на самата цена. На пример, ако се избере синхрон мотор со $\cos\varphi_n=0,8 \text{ cap.}$, наместо со $\cos\varphi_n=1$ цената на моторот се зголемува за околу 15 %, но затоа пак добивката на реактивна енергија изнесува 25% од P_n .

4.2 Кондензаторски батерии

Најраспространети уреди за компензација на реактивната енергија се кондензаторите. Популарноста на кондензаторските батерии како уреди за подобрување на $\cos\varphi$ се должи на нивните предности: мали специфични загуби на моќност (од 0,002 до 0,0045 kW/kVAr); лесна и проста експлоатација; лесна и евтина монтажа; мали почетни трошоци за поставување и инсталирање и тн.

Недостатоци на кондензаторите се: мала трајност при работа со номинален напон, а при работа со зголемен напон трајноста се намалува; се вклучуваат во степени (нема континуирана регулација; при опаѓање на напонот реактивната моќноста на кондензаторот значително се намалува ($Q_k=CU^2$) и тн..

Начинот на поврзување на кондензаторите во батерии се определува од нивниот вид, намената, напонот и моќноста. Нисконапонските кондензаторски батерии вообичаено се изведуваат како трифазни, а се поврзуваат секогаш паралелно. Кондензаторските батерии за висок напон обично се составени од еднофазни кондензатори кои се поврзуваат трифазно. Во секоја фаза на батеријата еднофазните кондензатори се соединети сериски, паралелно или мешано.

Реактивната моќност на кондензатор или батерија по фаза се определува по формулата:

$$Q_k = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^{-3} \text{ [kVAr]}$$

Зголемувањето на напонот и фреквенцијата и постоењето на виши хармоници го зголемуваат и оптоварувањето на кондензаторите, т.е

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{f_1}{f_n} \left(\frac{U_m}{U_n} \right)^2 \cdot \left[1 + \sum_{v=2}^{\infty} (v-1) \cdot \left(\frac{U_v}{U_m} \right)^2 \right] \quad 3$$

каде: v е редот на вишиот хармоник; U_v е ефективна вредност на v -тиот хармоник на напонот; U_m и f_1 се ефективна вредност на максималниот мрежен напон и неговата фреквенција; U_n и f_n - номинален напон и фреквенција на кондензаторот.

Загубите на енергија во кондензаторите зависат од: загубите во диелектрикот и загуби во струјно проводните делови.

Загубите на кондензаторот се опишуваат со $\text{tg } \delta$ т.е. од односот на активната и реактивна компонента на струјата. За кондензаторите со хартиено-маслена изолација и со напон $U \leq 660 \text{ V}$, $\text{tg } \delta$ е помал од 0,0045 при $f=50 \text{ Hz}$, а за кондензатори над 1000 V, $\text{tg } \delta$ е помал од 0,003.

Кондензаторските батерии се користат за поединечна, групна и централна компензација.

При индивидуалната компензација кондензаторите се поставуваат веднаш до потрошувачот и исклучиво се наменети за компензација на неговата реактивна енергија. Тие се вклучуваат и исклучуваат истовремено со потрошувачот, поради што нивното искористување е мало, но намалувањето на загубите на енергија е многу поголемо во споредба на другите два начини. Индивидуалната компензација посебно е погодна за поголеми потрошувачи со мал $\cos \phi$, кои се користат подолго време (на пример големи асинхрони мотори).

При групната компензација кондензаторските батерии се поставуваат во нисконапонските разводни ормани. Секоја батерија ја компензира реактивната моќност на група потрошувачи. Поради ова овој начин на компензација според своите карактеристики е во средина помеѓу другите решенија.

При централна компензација кондензаторите се поставуваат на едно место, на пример главната трафостаница. Искористувањето на кондензаторските батерии е големо, поради што се постигнува потребниот фактор на моќност со значително помалку кондензаторски батерии, во споредба со поединечната и групната компензација. Загубите на енергија во разводната мрежа на претпријатието не се намалуваат, што е и најголемата мана на овој начин на компензација.

Значи, за да се донесе одлука каква компензација ќе се примени треба претходно да се направи добра техничко економска анализа во која покрај цената на кондензаторите ќе се опфатат и трошоците поради загуби на енергија во разводот.

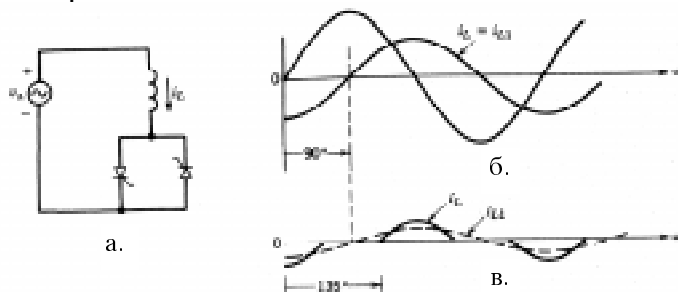
4.3 Статички преобразувачи

Со развојот на енергетската електроника за компензација на реактивната енергија се почесто се користаат т.н. статички системи за компензација на реактивната енергија. Тие овозможуваат континуирана регулација на факторот на моќност со што тој може да се одржува на саканата вредност, а поради многу брзото реагирање посебно се погодни за компензација на реактивни товари со променлив фактор на моќност као електролачни печки, млинови и тн.

Според начинот на работа можат да се поделат на: тиристорски управувани индуктивитети; тиристорски прекинувани кондензатори и прекинувачки преобразувачи со минимална акумулирана енергија.

4.3.1 Тиристорски управувани индуктивитети

Тиристорски управуваните индуктивитети (ТУИ) се однесуваат како променлива индуктивност, која може да се менува многу брзо. Бидејќи во системот каде има електромоторни погони може да се јави потреба од индуктивна и капацитивна реактивна моќност, тоа може да се постигне со паралелно поврзување на кондензаторски батерии со ТУИ.



Слика 3 Тиристорски управуван индуктивитет и бранови форми за различни α

На слика 3.а е прикажана принципиелна шема на една фаза од ТУИ. Под претпоставка дека активниот отпор е занемарливо мал, во стационарен режим струјата низ индуктивитетот може да се смета дека зависи од аголот на палење на тиристорите α . При агол на палење $0 < \alpha < 90^\circ$ (слика 3.б) не постои можност за регулација на струјата, а ако α се зголеми над 90° струјата низ индуктивитетот се намалува (слика 3.в), со што ќе се зголеми и ефективната вредност на индуктивноста. За $\alpha > 90^\circ$ струјата не е со синусна форма, па покрај основниот хармоник на струјата постојат и виши хармоници, со амплитуда која зависи од α . За да се поништи влијанието на хармониците со ред $3n$, вообичаено е трифазните ТУИ да се врзуваат во триаголник. Петиот и седмиот хармоник се поништуваат со примена на сериски поврзан филтер. Повисоките хармоници се поништуваат со помош на кондензаторски батерии.

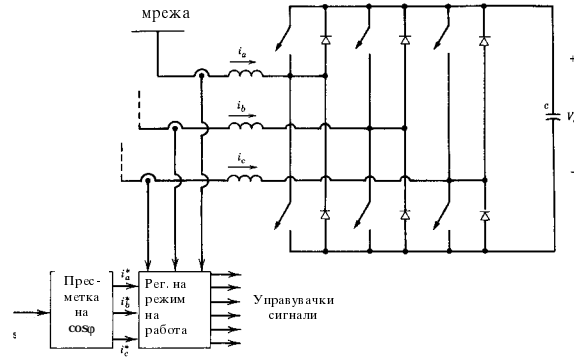
4.3.2 Тиристорски прекинувани кондензатори (ТПК)

Основната топологија на овие елементи за корекција на факторот на моќност се состои од кондензатори кои се приклучени на мрежа преку антипаралелна врска на тиристори. За разлика од ТУИ со ТПК не е можна континуирана промена на капацитетот на кондензаторите, туку само нивно вклучување или исклучување. Вклучувањето се врши во момент кога напонот на кондензаторите е еднаков со мрежниот, за да се избегне појава на ударни струи. Со самиот процес на вклучување и исклучување е овозможена контрола на вклучувањето на кондензаторот за секоја полупериода на напонот. Во серија на кондензаторите вообичаено се вклучуваат индуктивитети кои служат за ограничување на струјата низ кондензаторите. Со употреба на повеќе помали ТПК се овозможува контрола на реактивната енергија во мали дискретни чекори.

4.3.3 Прекинувачки преобразувачи со минимална акумулирана енергија (ППМАЕ)

Претходните преобразувачи за регулација на факторот на моќност во себе содржат релативно големи индуктивитети и кондензатори (голема акумулирана енергија) со кои се врши контрола на факторот на моќност, но тие сепак не

овозможуваат моментална контрола на факторот на моќност поради нивната голема инертност.



Слика 4. Прекинувачки преобразувачи со минимална акумулирана енергија

За да се надмине овој недостаток се користат ППМАЕ со топологија како на слика 4. Во прикажаниот преобразувач може да се контролира наизменичната струја и тоа не само по амплитуда туку и по фаза (таа да предначи или доцни) во однос на наизменичниот напон. Додека предадената или примената енергија од преобразувачот е нула, нема потреба од постоење на енергија во еднонасочното коло. Затоа во ваквиот преобразувач нема потреба од големи кондензатори, а еднонасочниот напон се регулира со преобразувач со променлив режим на работа, со што се овозможува да се контролира напонот на кондензаторот, а со тоа и факторот на моќност.

4.4 Филтри за поништување на виши хармоници

Во современите регулирани електромоторни погони неминовно се применуваат енергетски полупроводнички преобразувачи. Тие се генератори на виши хармоници кои влијаат на исправната работата на мрежата и квалитетот на напонот. Ако условите во мрежата се погодни, а се користат кондензаторски батерии за подобрување на $\cos\phi$, вишите хармоници може да предизвикаат резонантни појави во мрежата. Резонансата доведува до реагирање на заштитата или до оштетување на кондензаторските батерии поради преголеми струи.

Најчесто за намалување на вишите хармоници се применуваат пасивни и активни филтри. Во основа филтрите за виши хармоници се состојат од сериска врска на индуктивитети и кондензатори со точно определена резонантна фреквенција (кратник од основната). Ако е потребна филтрација на повеќе хармоници, мора да постојат филтри за секој хармоник посебно, а за тоа кои хармоници ќе се филтрираат зависи од нивниот спектар, но и од односот на моќноста на кондензаторите на филтерот и моќноста на куса врска на мрежата. Кај активните филтри е се поприсатна примена на уреди од енергетската електроника.

Филтрите најчесто се поврзуваат паралелно на мрежата, но постојат и сериски или сериско-паралелни филтри. Идеалниот паралелен филтер делува на тој начин што создава куса врска на резонантниот хармоник и наполно го поништува. Бидејќи во филтрите се користат елементи кои се употребуваат и за компензација на реактивна моќност, во праксата се изведуваат склопови кои се познати како уреди за компензација и филтрација [7], [9], [4].

При изборот на уредот за компензација и филтрација мора да се внимава на негово правилно димензионирање, бидејќи во спротивно наместо да се намали влијанието на хармониците може да се случи да се зголеми.

5. ЗАКЛУЧОК

Потребите од реактивна енергија во електромоторните погони се евидентни. Прекумерната потрошувачка на реактивна енергија предизвикува дополнителни трошоци на користената електрична енергија. Според важечкиот тарифен правилник цената на 1 kVA_{rh} (ако $\cos\varphi < 0,95$) се наплатува со цена која изнесува 30% од цената 1 kWh. Заради конкурентност на своите производи индустриските претпријатија мораат да водат сметка за овој факт. Во овој труд даден е преглед на потрошувачите на реактивна енергија и можните начини за корекција на факторот на моќност.

Предложени се и анализирани решенија кои овозможуваат со минимални инвестиции и интервенции во погонот да се подобри факторот на моќност.

Исто така е даден преглед на уредите за компензација на реактивна моќност - класични со примена на синхрони мотори и енергетски кондензатори и најсовремени трендови во ова подрачје, базирани на енергетската електроника. Кај регулираните наизменични ЕМП, прашањата за компензација на реактивната моќност и поништување на вишите хармоници мора да се разгледуваат заедно.

Електротехничкиот факултет од Скопје во рамките на заедничкиот европски проект "Развој на курсеви од енергетската електроника" остварува соработка и со Политехничкиот универзитет од Мадрид. За важноста на ова прашање е потврда дека во наставните планови на тој универзитет има посебен предмет за поправка на факторот на моќност, а во други предмети од енергетската електроника најчесто поправката на факторот на моќност е одделно поглавје.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Т. Петковски, Начини за компензација на реактивна моќност во електромоторните погони, дипломска работа, ЕТФ, 1994.
- [2] Н. И. Василев, С. Т. Сидеров, Електроснабдување на промишлени предпријатија, Техника, Софија, 1991.
- [3] В.С. Иванов, В. И. Соколов, Режији потребленија и качество електроенергии систем електроснабденија промишленых предпријатиј, Енергоатомиздат, Москва, 1987.
- [4] Тарифен систем за продажба на електрична енергија, Службен весник на СРМ бр. 45/82, 15/85.
- [5] Н. Ali Kojori, S. B. Dewan, J. Douglas Lavers, A large scale PWM solid state synchronous condenser, IEEE Trans. on IAS, vol. 28, No.2, pp. 41-49, 1992.
- [6] L. Moran, Ph. D. Ziogas, G. Joos, A solid state high performance reactive power compenzator, IEEE Trans. on IAS, vol. 29, No.5, pp. 969-978, 1993.
- [7] D. Andrews, M. T. Bishop, J. F. Witte, Harmonic measurements, analysis and power factor correction in a modern steel manufacturing facility, IEEE Trans. on IAS, vol. 32, No.3, pp. 617-624, 1996.
- [8] N. Mohan, T. Underland, W. P. Robbins, Power Electronics: converters, application and design, John Wiley&Sons, New York, 1989.

- [9] M.M. Cameron, Trends in power factor correction with harmonic filtering, IEEE Trans. on IAS, vol. 29, No.1, pp. 144-152, 1993.