

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. ИВАН РИЛСКИ”**

маг. инж. Николай Стоянов Минеков

**ПОВИШАВАНЕ ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА
ПРОМИШЛЕНО ПРЕДПРИЯТИЕ ЧРЕЗ
ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЕТО НА ГРУПА
МОЩНИ СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна
степен “Доктор”

**Професионално направление 5.2. „Електротехника,
електроника и автоматика“**

**Научна специалност 02.04.15 “Електроснабдяване и
електрообзавеждане” (по отрасли)**

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ: проф. д-р Евтим Руйчов Кърцелин

Рецензенти:

- 1. проф. д – р инж. Стоян Делев Стоянов**
- 2. доц. д – р инж. Недю Стратев Саравски**

София, 2012

Дисертационния труд е обсъден на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Електрификация на минното производство” при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски” (Протокол № 4/12.11.2012г.) и е насочен за публична защита пред Научно жури .

Дисертацията е разработена в катедра „Електрификация на минното производство” при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски”, а експерименталните изследвания са проведени в „Асарел – Медет” АД, гр. Панагюрище.

Докторантът работи като ръководител отдел „Ремонт ОФ, ВОС и SX-EW” в „Асарел – Медет” АД, гр. Панагюрище.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на **21.02.2013 г.** в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски”, Минно-електромеханичен факултет, зала 204, от 16⁰⁰ часа на заседание на Научно жури, назначено със Заповед № Р-1309/19.11.2012г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски”

Материалите по дисертацията са на разположение на всички интересувачи се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация” на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски”, гр. София.

Автор: **Николай Стоянов Минеков**

Заглавие: **Повишаване енергийната ефективност на промишлено предприятие чрез оптимизация управлението на група мощни синхронни двигатели**

Тираж: 100 бр.

Издателска къща „Св.Иван Рилски” при МГУ - София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА.

Актуалност. Една от основните задачи на съвременната електроенергетика е свързана с широкото внедряване на енергоспестяващи технологии. За решаването на тази задача се върви по две направления: първото е насочено към разработването на принципно нови технологични схеми, реализирани с постиженията на съвременните промишлени производства и на съвременната изчислителна техника. Второто направление е свързано с провеждането на енергиен мониторинг на използваните технологични процеси и технически схеми в реалното производство, оценка на реалната им енергоемкост и избор на нови решения, които осигуряват понижаване на тяхната енергоемкост до нива, сравними с най-добрите практики в света, осигуряващи конкурентно способност на произвежданата продукция.

Поради някои свои съществени предимства пред други видове електродвигатели и системи за задвижване, синхронните електродвигатели (СД) са намерили изключително широко приложение в различни отрасли на промишлеността. Особено съществено е тяхното използване като мощни електрораздвижвания в минната, нефтената и газова промишленост, във водоснабдителните системи за промишлено и питейно водоснабдяване и др. Ето защо една от първите и основни задачи, която се поставя за изследване и решаване от съвременната енергетика е свързана с изследването и оптимизацията на режима на работа на синхронните електродвигатели по условието за енергийна ефективност.

Тъй като генерираната от синхронния двигател реактивна мощност се намира в точно определена зависимост от консумираната активна мощност, напрежението на мрежата и възбудителния ток, то задачата за изчисляване на оптималния режим на работа на двигателя е свързана с определени трудности. Именно поради тази причина в литературата и в нормативно – техническите документи отсъстват сравнително прости, практически приложими методи за изчисляване режима на работа на двигателя с отчитане изменението на напрежението на захранващата мрежа. Ето защо извеждането на аналитични зависимости, които изразяват връзката между стойностите на захранващото напрежение на мрежата, възбудителния ток, активната и реактивна мощност на синхронния двигател и осигуряват определянето на оптималния му режим на работа продължава да бъде актуална задача за изследване.

СД днес са практически единствените, серийно произвеждани електрически машини, които се явяват плавно регулируеми източници на реактивна мощност без да внасят в електроразпределителните мрежи висши хармоници (кондуктивни смущения). Използването на компенсиращите възможности на СД е актуално, както от гледна точка на минимизиране на загубите на електрическа енергия, така и от позициите на удовлетворяване на изискванията на енергосистемата, свързано с оптимално ниво на реактивното натоварване на потребителите през върховото потребление на активна мощност от енергийната система. Показателите на режима на работа на СД се определят от собствените параметри на двигателя и неговата система на възбуждане,

параметри на близките електроконсуматори, захранвани от същия електроразпределителен възел, от който се захранва и СД, с отчитане на вероятностния характер на разпределение на параметрите на обзавеждането и на режимните величини.

Синхронният двигател (СД) се явява елемент на системите за електрозадвижване на определени машини, които влизат в определен технологичен поток или цикъл. За СД генерирането на РМ не е основна, а допълнителна функция. Използването на СД като източници на РМ е съпроводено с формирането на допълнителни загуби на електроенергия и съответно до допълнително прегряване на изолацията, което на свой ред съкращава срока за нейната експлоатация. При решаването на задачата за избиране режимите на работа на СД ръководещи и определящи са показателите за технико – икономическа ефективност.

Понастоящем по-голяма част от електрообзавеждането, в т.ч. и синхронните електродвигатели, намиращи се в експлоатация, са отработили част от своя експлоатационен ресурс. Избирането режима на работа на СД, които са изработили част от своя експлоатационен ресурс се явява важна и актуална задача за изследване и решаване.

В началото на ХХІ век енергетиката в света, включително и в Република България работи при условията и законите на пазарната икономика. Новите пазарни взаимоотношения между субектите в областта на енергетиката поставят нови, неизследвани и нерешени задачи на този етап.

Независимо от значителните постижения, получени в резултат на много годишни теоретични и експериментални изследвания от научно-изследователски колективи у нас и в чужбина, в началото на ХХІ век може да се посочи, че торията на синхронните машини не е завършена и особено в частта на енергийната им ефективност.

Това са част от факторите, които определят актуалността на темата, целта и задачите на дисертацията.

Цел на дисертационната работа. Повишаване на енергийната ефективност на промишлени обекти чрез оптимизация управлението режима на работа на група мощни синхронни двигатели.

За постигане целта на дисертационната работа са определени следните основни задачи за изследване и решаване:

1. Математически модели и основни характеристики на синхронните електродвигатели.
2. Изследване на основни режими и енергийни характеристики на синхронните двигатели.
3. Оптимизационни задачи в електроенергетиката за повишаване енергийната ефективност на промишлени обекти.
4. Експериментално изследване и технико-икономическа оценка на методи за повишаване на енергийната ефективност на промишлено предприятие чрез оптимизация на управлението на група мощни синхронни двигатели.

Практическа приложимост. Получените резултати в дисертацията се предоставят на ръководството на „Асарел-Медет” АД, гр. Панагюрище като основа за повишаване и управление на енергийната ефективност на дружеството при съвременните условия за пазарно предлагане и регулиране цената на електрическата енергия.

Апробация на работата. Основните резултати от дисертацията са докладвани на „Х-та Юбилейна национална конференция с международно участие по открит и подводен добив на полезни изкопаеми”, 07-11 юни 2009 г., гр. Варна; Научните сесии в МГУ „Св. Иван Рилски” през 2009, 2010 и 2011 г.

Структура и обем на дисертацията. Дисертацията се състои от увод, пет глави, заключение с приноси; изложена е на 195 страници с 34 броя таблици и 63 броя фигури, списък на използвана литература, която включва 204 заглавия, от които 185 на кирилица и 19 на латиница.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА.

ГЛАВА 1. ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ПРОМИШЛЕНИ ОБЕКТИ. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА.

В **Глава 1** са изследвани научни публикации и разработки в следните основни направления на съвременната енергетика:

- 1.1. Основни направления в научните изследвания за повишаване на енергийната ефективност на техническите системи и на технологични процеси в минната промишленост*
- 1.2. Използване на синхронните двигатели за управление на енергийната ефективност на промишлени обекти*
- 1.3. Управление на енергийната ефективност на промишлени обекти при условията на пазарно предлагане и регулиране цената на електрическата енергия*

Резултатите от литературния обзор в **Глава 1** са обобщени в следните основни изводи:

1. Има съществени резерви за повишаване на енергийната ефективност на промишлени обекти. Конкретните източници за повишаване на енергийната ефективност и размера на необходимите капиталовложения зависят от много фактори: характер на технологичните процеси; моралното и физическото състояние на технологичното и електрообзавеждането; перспективата за развитие; научния потенциал; от обема на пазара, който заема това производство в страната, региона и света и др.
2. Енергийната ефективност на промишлени обекти се явява един от основните и обективни показатели и критерий за оценка нивото на технологичните процеси и на използваното обзавеждане (технологично, електрическо, степен на автоматизация и др.) за определяне на неговата конкурентоспособност с други промишлени обекти в страната и чужбина.
3. На този етап в развитието на науката няма универсални решения и методи за обективна оценка на енергийната ефективност.
4. Широкото и повсеместно внедряване на преобразователни устройства, различни по принцип на действие, мощност и предназначение, за повишаване на качеството на системите за електрозадвижване и за целите на различни технологични процеси става причина за влошаване качеството на електрическата енергия и произтичащите от това отрицателни последици.
5. Влошените показатели за качество на електрическата енергия силно изострят проблема за електромагнитната съвместимост на електро-

обзавеждането и на микропроцесорните системи за управление, защита и контрол.

6. Поради някои свои безспорни предимства пред другите видове електродвигатели, синхронните електродвигатели са намерили широко приложение във всички сфери на човешката дейност и промишленото производство, включително и най-мощните системи за електрозадвижване в минната, нефтената, газовата, химическата промишленост и металургията, за водоснабдителни комплекси и др. Значителен е броят на научните публикации, в които обект на изследване са режимите на работа, техническите средства за управление, контрол и защита на синхронните електродвигатели.

7. Повишаване на надеждността на системите за електроснабдяване, управление режимите на работа и качеството на апаратите за релейна защита и автоматика продължават да бъдат обекти на научни изследвания. Изключително голям е броят на научните публикации, в които се разглеждат редица въпроси, задачи и проблеми, свързани с разработването и внедряването на микропроцесорни релейни защиты.

8. Управлението на енергийната ефективност на промишлени обекти при условията на пазарното предлагане и регулиране цената на електрическата енергия за условията на Република България е една съвсем нова задача за изследване и решаване.

Управлението на енергийната ефективност на промишлени обекти в развитите промишлени страни и либерализиран енергиен пазар има натрупан значителен опит. Практиката обаче показва, че в това отношение няма решения, които да бъдат универсални и приложими за всяка страна.

На практика, в реални условия, днес е много голяма вероятността, с която и най-модерни в проектно отношение и енергийно оптимални обекти да бъдат финансово неикономични само поради нерешени въпроси за осигуряване на условия и възможности за управление на енергийната ефективност на промишления обект при условията на пазарно предлагане и регулиране цената на електрическата енергия (лошо качество на планирано и договорено количество енергия за доставка, невъзможност за управление на загубите на електрическа енергия в зависимост от режима на работа на промишления обект и др.).

9. Анализът на взаимоотношенията между субектите, които участват в електроенергийния пазар на всяка страна показва за наличието на взаимоотношения, които не осигуряват и негарантират високо качество на електрическата енергия и висока надеждност на електроснабдяване.

10. Резултатите от експлоатацията на една от най-мощните и съвременна в техническо отношение на енергийни системи в САЩ показва, че пазарните принципи и закони са неприложими в областта на енергетиката.

Въз основа на литературния обзор са определени целта и задачите на дисертацията.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ И ОСНОВНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СИНХРОННИТЕ ДВИГАТЕЛИ

В Глава 2 на основа на общата теория на синхронните електрически машини са получени аналитични зависимости, които осигуряват възможност за изследване и анализ на работата на синхронните електродвигатели при различни режими на работа, закони на управление и параметри на захранващата електрическа мрежа.

За изследване на компенсиращата способност на СД при различни режими на работа и решаване на различни оптимизационни задачи е предложен следния аналитичен израз, записан в относителни еденици

$$q = \frac{Q}{S_n} = \frac{U_{*mp} E_{*f}}{x_{*d}} \cos \theta + \frac{U_{*mp}^2}{2} \left(\frac{1}{x_{*q}} - \frac{1}{x_{*d}} \right) \cdot \cos 2\theta - \frac{U_{*mp}^2}{2} \left(\frac{1}{x_{*q}} + \frac{1}{x_{*d}} \right). \quad (2.38)$$

Генерирането на реактивна мощност от синхронните двигатели е свързано с допълнителни загуби на активна мощност в тях. За определянето на тези загуби се разглежда баланса на активната мощност на синхронния двигател и отделянето на загубите, свързани с получаването на реактивна мощност.

Уравнението за баланса на загубата на активната мощност при номинален режим на СД е представено с израза

$$\Sigma P_n = P_{MT} + 3I_{1n}^2 r_a + 3I_{fn}^2 r_f = P_{м.см} + P_{с.н} + P_{fn}, \quad (2.46)$$

където: ΣP_n - сумарни номинални загуби на активна мощност;

$P_{м.см}$ - механически загуби и загуби в стоманата;

I_{1n}, I_{fn} - съответно стойност на статорния и роторния ток при номинален режим;

r_a - активното съпротивление на фаза в статора;

r_f - съпротивление на възбудителната намотка;

$P_{с.н}$ - загуби в намотките на статора (включително и допълнителните) при номинална стойност на възбудителния ток I_{fn} .

За определяне загубата на активна мощност при режим, различен от номиналния, уравнение (2.46) е представено в следния вид:

$$P_{M.cm} + P_{c.n} \left(\frac{I_1}{I_{1n}} \right)^2 + P_{fn} \left(\frac{I_f}{I_{fn}} \right)^2 =$$

$$= P_{M.k2} + P_{c.n} \left(\beta^2 \cos^2 \varphi_n + \alpha^2 \sin^2 \varphi_n \right) + P_{fn} \kappa_f^2, \quad (2.47)$$

След подходящо заместване и преобразуване е получен следния израз за определяне на активните загуби ΣP

$$\Sigma P = P_{M.cm} + \frac{P_{fn}}{1 + x_{*d}^2 + 2x_{*d} \sin \varphi_n} + \frac{P_{fn} x_{*d}^2 \cos^2 \varphi_n}{1 + x_{*d}^2 + 2x_{*d} \sin \varphi_n} \beta^2 + P_{c.n} \beta^2 \cos^2 \varphi_n +$$

$$+ \left[P_{c.n} \sin^2 \varphi_n + \left(\frac{1 - k_{f1}}{\alpha_1} \right)^2 P_{fn} \right] \alpha^2 + \frac{2P_{fn} k_{f1} (1 - k_{f1})}{\alpha'} \alpha. \quad (2.50)$$

Компонентите на загубата на активната мощност, зависещи от реактивната мощност, имат следното представяне

$$P_p = A\alpha^2 + B\alpha, \quad (2.51)$$

където

$$A = P_{c.n} \sin^2 \varphi_n + \left(\frac{1 - k_{f1}}{\alpha'} \right)^2 P_{fn}, \quad (2.52)$$

$$B = \frac{2P_{fn} k_{f1} (1 - k_{f1})}{\alpha'} \quad (2.53)$$

Стойностите на коефициентите A и B са приведени в справочната литература за синхронни двигатели.

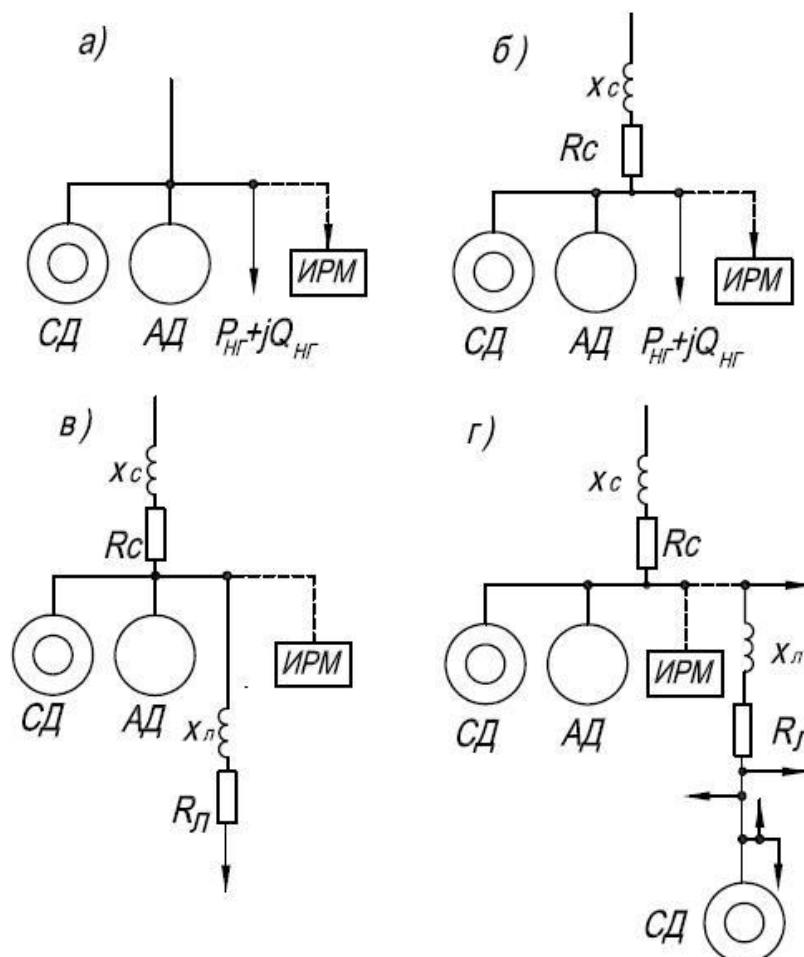
Изводи към **Глава 2:**

1. Получени са аналитични изрази за определяне на пълната, активната и реактивната мощност на синхронна машина в двигателен режим.
2. Получени са аналитични изрази за определяне на компенсиращата способност на синхронните двигатели.
3. Разкрита е връзката между компенсиращата способност на синхронните двигатели и загубите на активна мощност.
4. Обобщени са основните закони за регулиране на синхронните двигатели в зависимост от зададения режим на работа на двигателя и параметрите на захранващата електрическа мрежа.

ГЛАВА 3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОСНОВНИ РЕЖИМИ И ЕНЕРГИЙНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СИНХРОННИ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Голямото многообразие на схемите на разпределителните подстанции, използвани за электроснабдяване на съвременни промишлени предприятия са обобщени и представени с четири схеми (фиг. 3.1.), на които са приети

означенията: АД – асинхронни двигатели; $P_{нг}$ и $Q_{нг}$ – активен и реактивен товар на другите консуматори; ИРМ – източници на реактивна мощност; x_c и R_c – приведени индуктивно и активно съпротивление на системата; x_l и R_l – индуктивно и активно съпротивление на линията. На всяка схема на фиг. 3.1 са показани по един АД и СД, но в действителност техния брой се определя от конкретната схема и електрообзавеждането на обекта. Двигателите, имащи еднакви параметри и натоварване, се заменят с един еквивалентен.



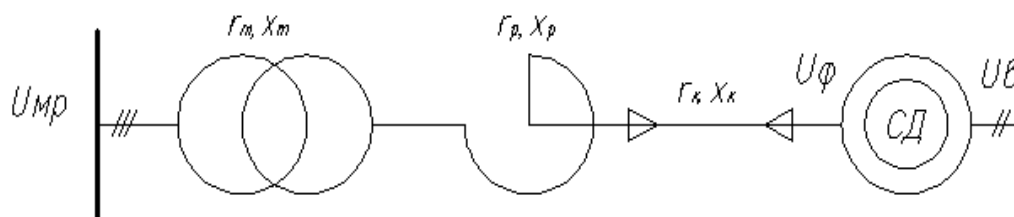
Фиг. 3.1. Обобщени схеми на разпределителна подстанция за захранване на промишлени предприятия

Един от пътищата за повишаване енергийната ефективност на редица промишлени предприятия в минната промишленост е свързан с оптимизацията на работата на синхронните двигатели.

Използването на компенсиращата способност на синхронните двигатели (СД) с отчитане на техния режим на работа, стойността на възбудителния ток и напрежението на захранващата мрежа представлява актуална задача за решаване на съвременната електроенергетика.

Точното определяне на компенсиращата способност на СД е възможно само при отчитането на спада на напрежение в захранващата мрежа

(понижаващ трансформатор, токоограничаващ реактор), както е показано на фиг. 3.2.



Фиг. 3.2. Типова схема за включване на синхронни двигатели СД

На фигура 3.2. са приети означенията U_{MP} , U_ϕ , U_B - напрежение на захранващата мрежа, текуща стойност на клемите на двигателя и напрежение на възбуждане; r_k , x_k - активно и реактивно съпротивление на захранващия кабел.

За определяне на зависимостта между реактивната мощност на СД и напрежението на клемите на двигателя, възбудителния ток и статичния товар на двигателя е получен израз

$$Q_{CD} = \frac{3U_{\phi H} I_{\phi H}}{x_d} \left(\sqrt{\frac{i_e^2 - \frac{\beta^2}{\gamma^2} i_{e.a.n.}^2}{i_0^2}} - \gamma^2 \right) \quad (3.34)$$

където

$U_{\phi H}$, $I_{\phi H}$ - съответно номинална стойност на фазното напрежение и ток на двигателя;

$\beta = \frac{P}{P_H} = \frac{I_a}{I_{aH}}$ - относително натоварване на статора по активна мощност;

$\gamma = \frac{U}{U_{\phi H}}$ - относителната стойност на напрежението на клемите на

двигателя;

i_e - възбудителния ток на СД ;

$i_{e.a.n} = \sqrt{i_{e.n}^2 - i_0^2 (1 + x_d \sin \varphi_H)^2}$;

$i_{e.a.n}$ - възбудителния ток на СД при $I_a = I_{aH}$;

$i_{e.n}$ - номинален възбудителен ток на синхронния двигател;

x_d - реактивно съпротивление на синхронния двигател по надлъжната ос,

о.е.;

i_0 - ток на възбуждане при празен ход на СД и номинално напрежение на статорните намотки.

За определяне на относителната стойност на напрежението на клемите на двигателя е получен израз

$$\gamma \approx 1 \pm \frac{Q_{x\Sigma}}{3U_{\phi}U_{\phi H}}. \quad (3.38)$$

Знакът (+) в израз (3.38) съответства на режим на превъзбуждане (двигателят генерира реактивна мощност в електрическата мрежа), а знакът (-) съответства на режим недовъзбуждане (двигателят консумира от електрическата мрежа реактивна мощност).

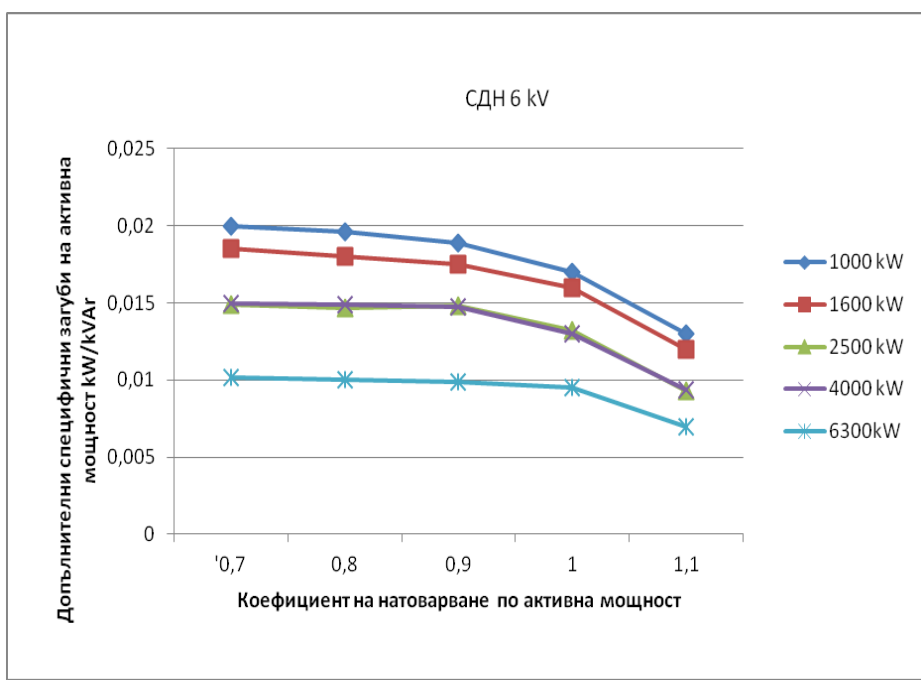
Както се вижда от израз (3.34), за определянето на γ е необходимо да се знае реактивната мощност, генерирана от СД (Q_{CD}), която на свой ред зависи от γ . Тази задача е възможно да бъде решена или чрез метода на последователните приближения (метод на итерациите), или чрез моделиране по структурната схема на СД, съставена с използването на уравненията (3.34) и (3.38).

От получените резултати следва извода, че при намаляване твърдостта на характеристиката на захранващата мрежа (увеличаване стойността на X_{Σ}^*) стойността на разполагаемата реактивна мощност на двигателя се намалява в границите на (5÷25%). Следователно, компенсиращата способност на двигателя се намалява. Този факт трябва да се отчита при изготвянето на баланса на реактивната мощност в захранващ възел при наличието на синхронни двигатели.

За оценка на ефективността от използване на синхронните двигатели в качеството им на източници на реактивна мощност е определен диапазона на изменение на разполагаемата реактивна мощност за различни типове синхронни двигатели при различни условия на работа и параметри на захранващата мрежа с отчитане на допълнителните загуби в тях, свързани (обусловени) от генерираната от тях реактивна мощност.

Двигателите за напрежение 6 и 10kV от серията СДН се явяват най-разпространеният тип СД. Изчисленията показват, че за всички обороти е възможно еднозначно да се твърди, че колкото по-голяма е мощността на двигателя, толкова по-малки са относителните специфични загуби на мощност $P_{СПЕЦ}$ (kW/kVA_{r}). За пример на фиг.3.5 са приведени зависимостите за допълнителните специфични загуби на двигателите за напрежение 6kV и обороти $n=1000 \text{ min}^{-1}$ при номинално захранващо напрежение.

От фиг. 3.5 следва извода, че при коефициент на натоварване от 0,7 до 0,9 допълнителните специфични загуби се изменят незначително.



Фиг. 3.5. Зависимост на допълнителните специфични загуби в синхронни двигатели за напрежение 6kV и обороти $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ при номинално захранващо напрежение

На фиг.3.6. са приведени зависимостите на допълнителните специфични загуби за синхронните двигатели с номинална мощност 2500kW, с различни обороти при номинално напрежение.

От графиката на фиг. 3.6. следва извода, че колкото по-малки са оборотите на СД, толкова по-високи са допълнителните специфични загуби на активна мощност, свързани с генерирането на реактивна мощност.

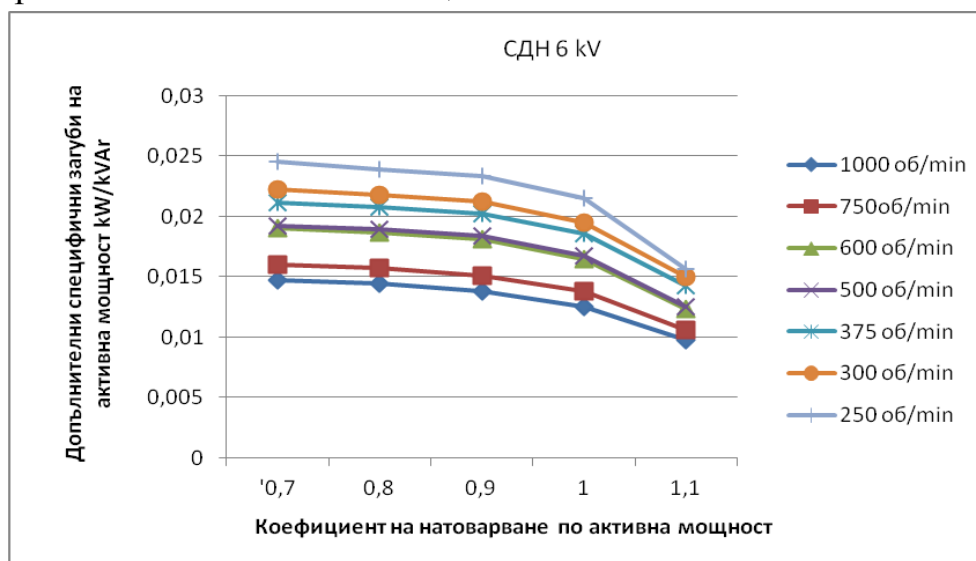
Тъй като въпроса за компенсацията на реактивна мощност е тясно свързан с нивото на напрежението на електрическата мрежа, проведено е изследване как се изменя разполагаемата реактивната мощност и допълнителните специфични загуби на активна енергия при различни стойности на захранващото напрежение.

От получените резултати следва, че при понижаване на захранващото напрежение, се повишава разполагаемата РМ на СД, но заедно с това се увеличават и допълнителните специфични загуби на активна мощност.

Понастоящем по-голямата част от електрообзавеждането (в т.ч. и СД) е отработило значителна част от своя ресурс. Ето защо избирането на режима на работа на СД, които са изработили голяма част от своя ресурс се явява важна и актуална задача за изследване и решаване.

Синхронният електродвигател (СД) се явява елемент на системите на електрозадвижване на определени машини и уредби, които влизат в определен технологичен поток или цикъл. За СД генерирането на РМ не е основна, а допълнителна функция. Използването на СД като източници на РМ е

съпроводено с формирането на допълнителни загуби на електроенергия и съответно на допълнително прегряване на изолацията, което на свой ред съкращава срока за нейната експлоатация.



Фиг. 3.6. Зависимост на допълнителните специфични загуби за синхронни двигатели с мощност 2500kW, с различни обороти и номинално напрежение

Получени са изрази за определяне оптималното натоварване на СД по РМ. Все пак, тези изрази не отчитат топлинното износване на изолацията на двигател в резултат на използването на СД като източник на реактивна мощност, което от своя страна може да стане причина за преждевременна замяна на СД или до изваждането му за капитален ремонт.

За решаване на поставената задача се приема хипотезата за експоненциална зависимост на температурата на изолацията от мощността. Установената стойност на температурата на изолацията се получава от номиналната стойност на загубата на мощност. Повишаване на температурата на изолацията при друга стойност на загубата на мощност се определя с изрази

$$\theta_U = \theta_H - \theta_H e^{-\frac{\Delta P_{CD}}{\tau}};$$

където θ_H - номинална стойност на прегряване на изолацията; τ - константа на загубите на мощност, която числено е равна на загубата на мощност, при която прегряването се изменя 2,73 пъти ($\tau = \Delta P_{EП}/4$).

Тогава намаляването на температурата на изолацията е

$$\Delta \tau = \theta_H - \theta_U = \theta_H e^{-\frac{\Delta P_{CD}}{\tau}}$$

Разглеждат се няколко подхода за използване на СД, които са отработили част от своя ресурс:

1. Синхронният двигател не се използва за генериране на РМ. При това условие оставащия срок на експлоатация се удължава.

2. Синхронният двигател се използва за генериране на РМ, на пълна мощност, но в резултат на по-бързото износване на изолацията, предизвикано от генерирането на РМ, необходимо е да се монтира нов синхронен двигател (СД) или да му се извърши капитален ремонт на статора.

За определянето (избирането) на оптимален вариант се разглеждат изразите за приведените разходи за двата варианта.

От изложеното следва, че при съвременните условия и значително износване на СД, режимите на тяхната работа е необходимо да се избират по два основни критерии: по критерия на приведените разходи за генериране на РМ и по критерия, отчитащ ускореното износване на изолацията, предизвикано от използването на СД като източници на РМ.

При наличие в промишлените предприятия на синхронните двигатели (СД) с голяма мощност най – често се поставя и решава задачата за използване на СД за компенсиране на реактивната мощност. Генерираната от СД реактивната мощност се използва за компенсирането на реактивните товари на шини 6/10 kV и се предава на страна 0,4 kV .

За осигуряване на оптимален режим на работа на СД като източници на РМ е необходимо да се реши и задачата за оценка възможностите на монтираните силови трансформатори за пренасяне на зададената РМ от шини 6 kV на шини 0.4 kV

Най-голямата реактивна мощност, която е възможно да бъде предадена от страна на 6/10 kV на страна 0,4 kV при N на брой силови трансформатори с еднаква мощност се определя по зависимостта:

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{НОМ})^2 - P^2} \quad (3.56)$$

където P - сумарна активна мощност (товар) на страна 0,4 kV; $S_{НОМ}$ - номинална мощност на силовите трансформатори; N и β - брой на трансформаторите и на техните коефициенти на натоварване.

Изводи към Глава 3:

1. Изследвано е влиянието на напрежението на захранващата мрежа на компенсиращата способност на синхронните двигатели в резултат на което се обобщава извода, че при зададени стойности на коефициента за натоварване на СД по реактивна (α) и реактивна (β) мощност, минималните стойности на загубите на мощност в статорната намотка, в стоманата на статора и във

възбудителната намотка се получават при различни стойности на напрежението на захранващата мрежа.

2. За оценка ефективността на използване на СД като източници на реактивната мощност е определен диапазона на изменение на разполагаемата реактивна мощност при следните условия:

- за различни типове синхронни двигатели;
- при различни условия на работа на СД;
- при различни параметри на захранващата мрежа (различни стойности на захранващото напрежение);
- с отчитане на допълнителните загуби в СД, свързани с генерирането на реактивна мощност.

На основата на паспортни и литературни данни за СД е изчислена разполагаемата реактивна мощност и допълнителните загуби ΔP при различни стойности на коефициента на натоварване по активна мощност β и различни стойности на захранващото напрежение за различни типове СД.

3. Поставена е научната задача за разработване и усъвършенстване на методическия подход за определяне режима на работа на СД, които са отработили част от своя експлоатационен ресурс и оптимизиране на технологията за тяхната експлоатация.

На основата на проведения анализ и получени резултати при избиране режима на работа на СД, които са отработили част от своя експлоатационен ресурс е необходимо да се отчитат следните два съставни критерия:

- 1) критерии за приведените разходи за генерирането на реактивна мощност.
- 2) критерии, отчитащ ускореното износване на изолацията, свързано с генерирането на реактивната мощност.

Определянето на параметрите на приведените разходи за конкретни техническо-икономически стойности и временни показатели за всеки обект е една конкретна и самостоятелна задача.

4. Изследвано е влиянието на мощността на силовите трансформатори на ефективното използване на синхронните двигатели като източници на реактивна мощност.

Предложен е аналитичен израз за определяне на реактивната мощност, която е възможно да бъде предадена от страна на 6 (10) kV на страна 0,4 kV при зададен брой и параметри на силовите трансформатори.

ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИОННИ ЗАДАЧИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКАТА ЗА ПОВИШАВАНЕ ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ПРОМИШЛЕНИ ПРЕДПРИЯТИЯ

В глава 4 са поставени и изследвани различни оптимизационни задачи в електроенергетиката, резултатите от които осигуряват възможност за обоснован избор на решения за повишаване на енергийната ефективност на промишлени обекти.

4.1. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОПТИМАЛНИ ПАРАМЕТРИ НА СИСТЕМА ЗА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ НА ПРОМИШЛЕНО ПРЕДПРИЯТИЕ

Определяне на оптималната комбинация между параметрите на електропроводната линия (ЕПЛ) сечение, ниво на напрежението и стойност на компенсираща мощност, осигуряващи максимален икономически ефект при пренасянето и преобразуването на електрическата енергия се явява една от основните задачи при оптимизацията на системите за електроснабдяване (СЕС) на промишлени предприятия.

Обикновено оптималните стойности на параметрите на схемата на СЕС и икономическия ефект, който се получава се определят отделно за всеки един параметър, без отчитане на съществуващите между тях връзки. Приемайки под внимание на съществуващите връзки между тези параметри се съставя уравнението за определяне на икономисаната мощност на електропроводната линия (ЕПЛ):

$$\begin{aligned} P_{\text{ик}} = & \frac{P_{\text{л}}^2 + Q_{\text{л}}^2}{U^2} \cdot \frac{(s_2 - s_1)\rho_0 l}{s_2 s_1} + \\ & + \frac{2Q_{\text{л}}Q_{\text{к.у.}} - Q_{\text{к.у.}}^2}{U^2} \cdot \frac{\rho_0 l}{s_1} + \\ & + 3I_{\text{н}}^2 \left(\frac{2\Delta U}{U} + \frac{\Delta U^2}{U^2} \right) \frac{\rho_0 l}{s} \end{aligned} \quad (4.1)$$

където: $P_{\text{л}}$ и $Q_{\text{л}}$ – активен (kW) и реактивен ($kVAr$) товар на ЕПЛ;
 s – сечение на проводниците, mm^2 ;
 ρ_0 – специфично съпротивление на проводниците, Ω/km ;
 $Q_{\text{к.у.}}$ – реактивна мощност на компенсиращите устройства, $kVAr$;
 ΔU – допълнително напрежение на регулатора на напрежение;
 l – дължина на кабелната линия, km ;
 U – напрежение на мрежата, kV ;
 $I_{\text{н}}$ – номинална стойност на товарния ток, A ;

Трите съставлящи на това уравнение отразяват икономията на мощност, която се получава съответно в резултат на изменението на сечението на проводника от S_1 до S_2 , от компенсацията на реактивната мощност (КРМ) и от увеличаване на напрежението на мрежата.

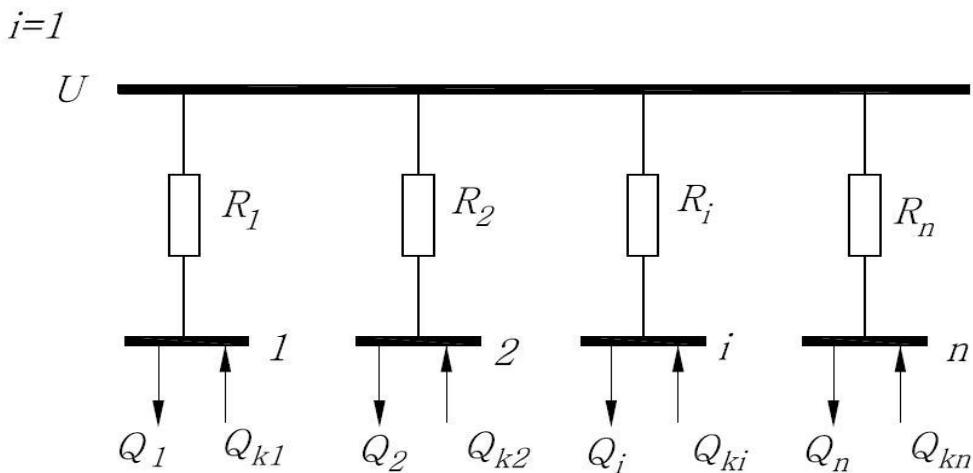
Анализът на уравненията (4.1) показва, че всички параметри на схемата на СЕС са взаимно свързани, като при това има и връзки с обратно въздействие. Например при увеличаване сечението на ЕПЛ се намалява ефективността от компенсиране на реактивната мощност и регулиране на напрежението, което води до намаляване на икономическия ефект. Ето защо е необходимо комплексното решаване на задачата за оптимизация на параметрите на схемата на ЕСС и отчитане на обратните връзки.

4.2. ОПТИМАЛНО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА КОМПЕНСИРАЩИТЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМАТА ЗА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ НА ПРОМИШЛЕНО ПРЕДПРИЯТИЕ

За радиалната схема на електроснабдяване, показана на фиг. 4.4. се формулира задачата за условна оптимизация. От захранващия източник с напрежение U се захранват n потребители, всеки от които консумира реактивна мощност, съответно $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$. Активните съпротивления на електропроводните линии между захранващия източник и потребителите имат следните стойности: $R_1, R_2, \dots, R_n$.

Приема се, че при всеки потребител е възможно да се монтира компенсиращо устройство с мощност Q_{ki} .

Поставя се следната оптимизационна задача: Да се намери оптималното разпределение между потребителите $1, 2, \dots, n$ на зададената обща мощност на компенсиращите устройства Q_k при критерии за оптималност – минимум загуби на активна мощност в електроснабдителната схема.



Фиг. 4.4. Радиална схема на електроснабдяване.

Целевата функция, която подлежи на оптимизация (минимизация), определяща загубите на активна мощност в схемата, има следния вид

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{ki})^2}{U^2} R_i \rightarrow \min, n = 1, 2, \dots, n \quad (4.15)$$

Относителният минимум на целевата функция ще се търси при ограничението

$$\sum_{i=1}^n Q_{ki} = Q_k \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n Q_{ki} - Q_k = 0 \quad (4.16)$$

Функцията на Лагранж има следното представяне

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{ki})^2 R_i}{U^2} + \lambda \left(\sum_{i=1}^n (Q_{ki} - Q_k) \right) \rightarrow \min \quad (4.17)$$

За определяне минимума на функцията L се изчисляват нейните частни производни и се приравняват на нула

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial Q_1} &= \frac{-2R_1(Q_1 - Q_{k1})}{U^2} + \lambda = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial Q_2} &= \frac{-2R_2(Q_2 - Q_{k2})}{U^2} + \lambda = 0, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{ki}} &= \frac{-2R_i(Q_i - Q_{ki})}{U^2} + \lambda = 0, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{kn}} &= \frac{-2R_n(Q_n - Q_{kn})}{U^2} + \lambda = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= \sum_{i=1}^n Q_{ki} - Q_k = 0. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Анализът на системата (4.18) показва, че оптималното разпределение на зададената обща мощност Q_k на компенсиращите устройства при радиална схема на електроснабдяване се подчинява на следното условие (равенство)

$$R_1(Q_1 - Q_{k1}) = R_2(Q_2 - Q_{k2}) = \dots = R_i(Q_i - Q_{ki}) = \dots = R_n(Q_n - Q_{kn}). \quad (4.19)$$

Разглежда се и задачата за оптимално разпределение на зададената обща мощност Q_k на компенсиращите устройства между потребителите $1, 2, \dots, n$, които имат магистрална схема на електроснабдяване.

4.3. СИНХРОННИТЕ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ КАТО ОБЕКТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ ПО УСЛОВИЕТО ЗА ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ

4.3.1. Закон за икономично честотно управление на синхронни двигатели

Известно е, че управлението на СД по минимална стойност на статорния ток и при зададени стойности на скоростта и момента осигурява режим на работа, близък до оптималния по минимални загуби, а също така се явява и благоприятен от гледна точка на условията за работа на вентилните преобразуватели на честота. Освен това, управлението по минимална стойност на тока се явява необходимо условие за реализацията на бързодействащи системи за управление.

Изпълнено е изследването на закон за икономично честотно управление на СД с електромагнитно възбуждане, работещ с $\cos\varphi = 1$. Известно е, че претоварващата способност на двигателя при зададения закон за управление остава постоянна и равна на номиналната, а загубите са близки до минималните. Отчитането на активното съпротивление на статорната намотка позволява да се анализира работата на СД със средна и малка мощност на ниски честоти.

За определяне на закона за регулиране на напрежението U при честотно управление, осигуряващ постоянна претоварваща способност на СД, работещ с $\cos\varphi = 1$, се използва отношението

$$\frac{M}{M_n} = \frac{U^2}{U_n^2} \cdot \frac{\omega_{сн}}{\omega}.$$

Като се приемат означенията

$$\mu = \frac{M}{M_n}; \varphi = \frac{U}{U_n} \text{ и } \alpha = \frac{f}{f_n}$$

е получен следния израз

$$\varphi = \sqrt{\mu\alpha}, \quad (4.38)$$

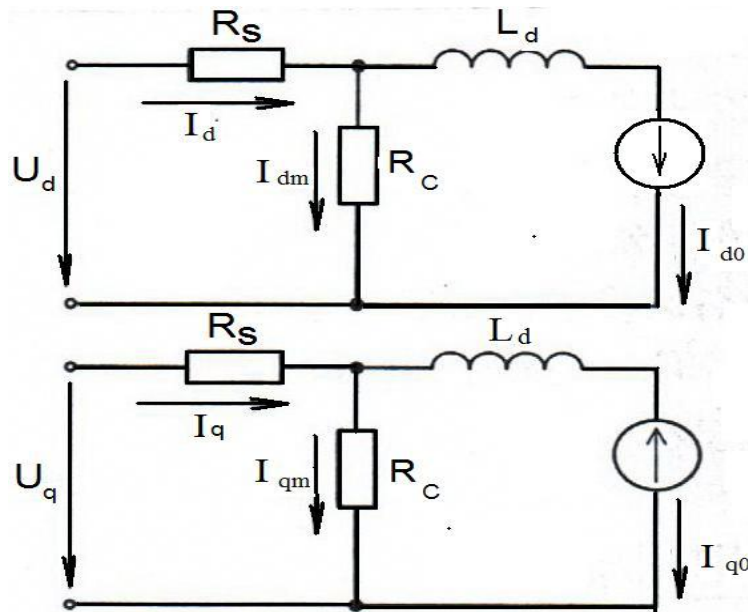
където μ, φ, α – относителни стойности на момента, напрежението и честотата.

За реализирането на закон за икономично управление на СД с $\cos\varphi = 1$ е необходимо да се реализира изпълнението на условията

$$\begin{aligned} \varphi &= \sqrt{\mu\alpha}; \\ i_s &= \frac{\varphi}{\alpha} F \sqrt{1 + \alpha^2 \operatorname{tg}^2 \theta_n}. \end{aligned}$$

4.3.2. Повишаване на енергийната ефективност на синхронните електродвигатели чрез оптимизация на потокосцеплението

За получаване на аналитични изрази за определяне на токовете в статорната намотка на синхронния двигател в dq – координатна система се разглежда заместваща схема на синхронната машина с отчитане на магнитните загуби, показана на фиг. 4.7.



Фиг. 4.7. Заместващи схеми на синхронен двигател, съответно d и q координатни оси.

За токовете в статорната намотка се записват изразите:

$$\begin{aligned} I_d &= I_{d0} + I_{dm} \\ I_q &= I_{q0} + I_{qm}. \end{aligned} \quad (4.49)$$

където: I_{d0}, I_{q0} – токове в статорните намотки без отчитане на магнитните загуби.

I_{d0}, I_{q0} – еквивалентни на магнитните загуби токове съответно по dq – координатни оси.

Уравненията за потокосцепления на статора се представя в следния вид:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d I_{d0} + L_{md} I'_{fd} \\ \psi_q = L_q I_{d0} \end{cases} \quad (4.50)$$

където: $L_d = L_{es} + L_{md}$ – еквивалентна индуктивност на d – статорната намотка в dq – координатна система;

$L_q = L_{es} + L_{mq}$ – еквивалентна индуктивност на q – статорната намотка в dq – координатна система;

L_{es} – индуктивност на разсейване;

L_{md}, L_{mq} – еквивалентни индуктивности на намагнитване по d и q – координатни оси;

I'_{fd} – еквивалентен възбудителен ток на СД.

За общите загуби в СД се получава израз:

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{3}{2} [A \psi_d^2 + B \psi_d + C \psi_d \psi_q + D \psi_q + E \psi_q^2] \quad (4.58)$$

където: $A = \frac{R_s}{L_d^2} + \frac{\omega_e^2 R_s}{R_c^2} + \frac{\omega_e^2}{R_c}$; $B = -\frac{2R_s L_{md} I'_{fd}}{L_d^2}$; $C = \frac{2\omega_e R_s}{R_c} \left(\frac{1}{L_q} + \frac{1}{L_d} \right)$;

$$D = \frac{2R_s L_{md} I'_{fd} \omega_e}{R_c L_q}; \quad E = \frac{R_s}{L_q^2} + \frac{\omega_e^2 R_s}{R_c^2} + \frac{\omega_e^2}{R_c} \quad (4.59)$$

В качеството на оптимизационен функционал се избира израза:

$$J = A\psi_d^2 + B\psi_d + C\psi_d\psi_q + D\psi_q + E\psi_q^2 \quad (4.60)$$

Екстремални стойности на функцията $J = \psi_d + \psi_q$ ще бъдат корените на уравнението:

$$\frac{dJ(\psi_d, \psi_q)}{d\psi_d} = 0 \quad (4.61)$$

Потокосцепленията ψ_d и ψ_q са свързани помежду си чрез уравненията електромагнитния момент на синхронния двигател:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} p_0 (\psi_d I_q - \psi_q I_d) = \frac{3}{2} p_0 \psi_q \left(\frac{\psi_d}{L_q} - \frac{\psi_d - L_{md} I'_{fd}}{L_d} \right) = \\ &= \frac{3}{2} \frac{p_0 \psi_q}{L_d L_q} [\psi_d (L_d - L_q) + L_{md} L_q I'_{fd}] \end{aligned} \quad (4.62)$$

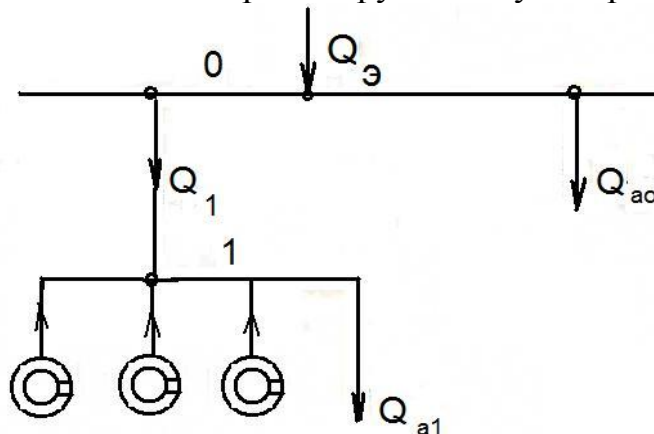
Определяйки оптималните стойности на съставлящите на потокосцеплението $\psi_{d\text{опт}}$, в съответствие с (4.63) е възможно да се изчисли стойността потокосцеплението по q – координатна ос $\psi_{q\text{опт}}$ и оптималното потокосцепление на статора по израза:

$$\Psi_{s\text{опт}} = \sqrt{\Psi_{q\text{опт}}^2 + \Psi_{d\text{опт}}^2} \quad (4.68)$$

Резултатите от моделирането на системата при номинални и оптимални стойности на потокосцеплението показват, че чрез изменение (управление) на потокосцеплението се реализира възможност за съществено намаляване модула на статорния ток при постоянна стойност на двигателния момент, което се явява доказателство за ефективността на предложения метод.

4.5.1. Определяне на закона за управление на група синхронни двигатели по условието за поддържане на зададената стойност на реактивната мощност

За определяне на закона за регулиране на синхронните двигатели, осигуряващи поддържането на зададена стойност на реактивната мощност $Q_{зад}$ на границата между енергосистемата и промишленото предприятие, се разглежда елементарен възел, от който се захранва група консуматори (фиг. 4.11).



Фиг. 4.11. Изчислителна схема на елементарен възел за захранване на група консуматори.

Използвайки квадратичната зависимост на загубите на активна мощност в СД от тяхното натоварване по реактивна мощност, целевата функция и уравнението на връзката са представени в следния вид:

$$F = \sum_{i=1}^n A_i Q_{ci}^2 + \sum_{i=1}^n B_i Q_{ci} - \lambda \left(\sum_{i=1}^n Q_{ci} + Q_{зад} - Q_{a1} - Q_{a0} \right) \rightarrow \min; \quad (4.87)$$

$$Q_{a1} + Q_{a0} - \sum_{i=1}^n Q_{ci} = Q_{зад}, \quad (4.88)$$

където: A_i, B_i - компоненти на специфичното нарастване на загубите на активна мощност в СД, съответно $\kappa W / kVAr^2$ и $\kappa W / kVAr$;

Q_{ci} - генерирана от i -я СД реактивна мощност, $kVAr$;

Q_{ai}, Q_{a0} - мощността на асинхронните товари, $kVAr$;

n - брой на СД, захранвани от този възел;

λ - множител на Лагранж, $\kappa W / kVAr$;

$Q_{зад}$ - зададената стойност на реактивна мощност на границата между енергосистемата и промишленото предприятие.

Приравнявайки на нула производната $\partial F / \partial Q$ на функцията (4.87), се получават оптималните решения

$$Q_{ci} = \frac{\lambda - B_i}{2A_i} \quad (4.89)$$

Ако се направят означенията

$$d_i = \frac{1}{2A_i}, \frac{MBAr^2}{\kappa Bm}; \quad e_i = \frac{B_i}{2A_i} MBAr$$

и се извърши сумиране на мощностите на СД, се получава:

$$\sum_{i=1}^n Q_{ci} = \lambda \sum_{i=1}^n d_i - \sum_{i=1}^n e_i. \quad (4.90)$$

След заместване на (4.90) в (4.88) и подходящо преобразуване се определя множителя на Лагранж λ , т.е.

$$\lambda = \frac{Q_a - Q_{зад} + E}{D}, \quad (4.91)$$

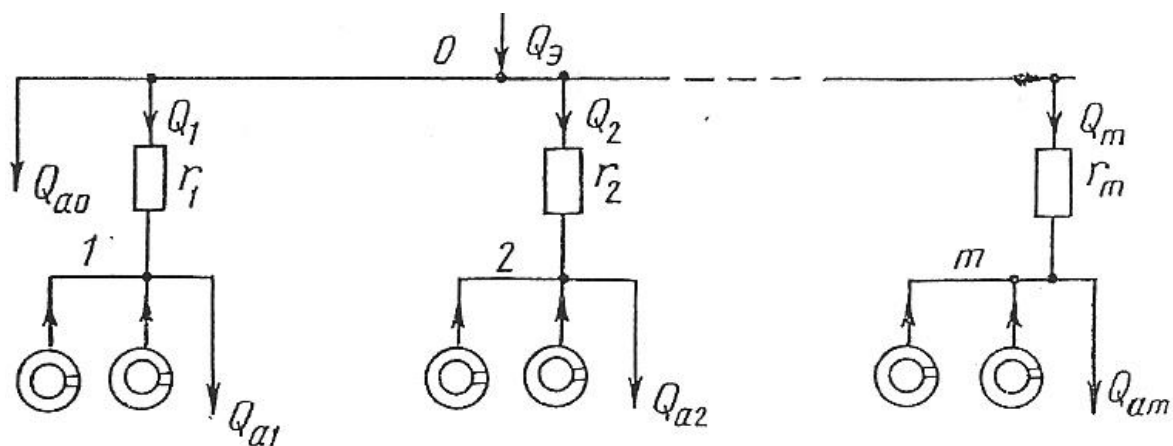
където

$$E = \sum_{i=1}^n e_i; \quad D = \sum_{i=1}^n d_i; \quad Q_a = Q_{a1} + Q_{a0}.$$

Отчитайки стойността на λ в (4.89) се определя оптималната стойност на реактивната мощност, която трябва да генерира i -я СД:

$$Q_{ci} = (Q_a - Q_{зад}) \frac{d_i}{D} + \frac{E}{D} d_i - e_i. \quad (4.92)$$

Направена е оценка на възможността за използването на получения закон за регулиране (4.92) за по-сложни системи на електроснабдяване (фиг. 4.12), съдържащи m възела за захранване на електрически консуматори с включени СД.



Фиг. 4.12. Изчислителна схема за разклонени захранващи възли за включване на консуматори.

4.5.3. Оптимизация режима на работа на група мощни синхронни двигатели в експлоатация по метода на относителните нараствания

В редица промишлени предприятия се намират в експлоатация по няколко групи разнотипни синхронни двигатели. Елементите на загубите A и B , зависещи от реактивната мощност за тези двигатели са съществено различни. Ето защо за компенсацията на общия реактивен товар на предприятието Q_k е необходимо да се определи икономически най-целесъобразното решение за неговото разпределение между отделните синхронни двигатели.

Практически дадената задача се решава чрез определянето на оптимален вариант за възбуждане на синхронните двигатели, участващи в компенсацията.

В основата на изчисленията за определяне на оптималния режим на възбуждане на синхронните двигатели е положен метода на относителните нараствания. За определяне на относителните нараствания се определя първата производна на израза за активните загуби P_p , зависещи от реактивната мощност, т.е.

$$\delta = \frac{dP_p}{dQ}. \quad (4.104)$$

За синхронни двигатели изразът (4.104) има следното представяне

$$\delta = \frac{dP_p}{dQ} = \frac{2AQ}{Q_H^2} + \frac{B}{Q_H}. \quad (4.105)$$

Разглежда се следната най-обща задача:

Общата за компенсиране реактивна мощност на промишлено предприятие Q_k да се раздели между два източника, относителното нарастване на които има линейна зависимост от реактивните товари. Това условие аналитично се записва по следния начин

$$\delta_1 = \alpha_1 Q_1,$$

$$\delta_2 = \alpha_2 Q_2,$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_k.$$

Общите загуби на активна мощност P_p за производство на реактивна мощност Q_k се определят с използване на израза:

$$\begin{aligned} P_p = \delta_1 Q_1 + \delta_2 Q_2 &= \alpha_1 Q_1^2 + \alpha_2 Q_2^2 = \alpha_1 Q_1^2 + \alpha_2 (Q_k - Q_1)^2 = \\ &= Q_1^2 (\alpha_1 + \alpha_2) + \alpha_2 Q_k^2 - 2\alpha_2 Q_k Q_1. \end{aligned} \quad (4.106)$$

За определяне минималната стойност на загубите, първата производна на P_p по Q , се приравнява на нула и се определя знака на втората производна

$$\frac{dP_p}{dQ} = 2Q_1(\alpha_1 + \alpha_2) - 2\alpha_2 Q_k = 0. \quad (4.107)$$

Знакът на втората производна

$$2(\alpha_1 + \alpha_2) > 0,$$

е показател, че функцията $P_p = f(Q)$ действително има минимум.

От (4.107) се получават зависимостите:

$$Q_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} Q_k,$$

$$Q_2 = Q_k - Q_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} Q_k,$$

$$\delta_1 = \alpha_1 Q_1 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} Q_k,$$

$$\delta_2 = \alpha_2 Q_2 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} Q_k,$$

От получените изрази за δ_1 и δ_2 следва, че

$$\delta_1 = \delta_2,$$

т.е. минимум загуби на активна мощност се получава при равенство на относителното нарастване на двата източника.

Полученият извод може да се разпространи и за произволен брой източници на реактивна мощност. Следователно, за група, състояща се от n синхронни двигатели, оптималното разпределение на реактивното натоварване между тях се получава при изпълнение на условието за равенство на относителните нараствания на активните загуби на всички n двигатели, т.е. ако

$$Q_k = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i + \dots + Q_n,$$

загубите P_p са минимални при изпълнението на условията

$$\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_i = \dots = \delta_n,$$

където: $Q_1, Q_2, Q_i, Q_n, \delta_1, \delta_2, \delta_i, \delta_n$ - съответно частта на реактивна мощност и относителното нарастване на всеки един от n -те синхронни двигатели, участващи в компенсацията.

Всяко друго разпределение на общата реактивна мощност Q_k в предприятието ще води до увеличаване на активните загуби P_p .

Изводи към Глава 4:

1. Получен е математически модел за решаване на оптимизационната задача за определяне на оптимална комбинация на параметрите на въздушен електропровод (сечение, ниво на напрежението и мощността на компенсиращото устройство), осигуряваща най – голям икономически ефект при пренасяне на електрическата енергия.

2. Предложен е метод за повишаване на енергийната ефективност на система за електрозадвижване със синхронни електродвигатели чрез оптимизация на потокосцеплението на статорната намотка на двигателя.

3. Получени са условията за оптимално разпределение на компенсиращите устройства при радиална и магистрална схема за електроснабдяване на електроконсуматорите.

4. Определен е закона за регулиране на напрежението на статора при честотно управление, осигуряващ постоянна претоварваща способност на СД, работещ с $\cos \varphi = 1$.

5. Определен е закона за регулиране на група синхронни двигатели, осигуряващи поддържането на зададена стойност на реактивната мощност на границата на електроразпределителното дружество (доставчика) и потребителя (промишлен обект) при следните условия:

- за един разпределителен възел, от който се захранва група синхронни двигатели;
- за сложна система за електроснабдяване, съдържаща m разпределителни възела.

6. Определени са условията, при които не е целесъобразно да се използва даден разпределителен възел за оперативно регулиране на реактивната мощност. Определени са условията и местата, в които трябва да се монтират устройства за програмно управление на възбуждането на синхронните двигатели.

7. Разработен е обоснован метод за оптимизация режима на работа на група мощни синхронни двигатели (по метода на относителните единици).

ГЛАВА 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ И ТЕХНИКО ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА НА МЕТОДИ ЗА ПОВИШАВАНЕ ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ПРОМИШЛЕНО ПРЕДПРИЯТИЕ ЧРЕЗ ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЕТО НА ГРУПА МОЩНИ СИНХРОНИ ДВИГАТЕЛИ

За обекти на изследване са определени две групи синхронни двигатели в експлоатация, които на практика участват в компенсацията на реактивната мощност в предприятието. Първата група синхронни двигатели – тип СДМ 32-22-34-60 УХЛ4, задвижват автогенни мелници. Втората група синхронни двигатели тип СДС 19-56-40 УХЛ4 - задвижват топкови мелници.

Основните номинални технически параметри на двата типа синхронни двигатели са дадени в таблица 5.1.

Таблица 5.1.

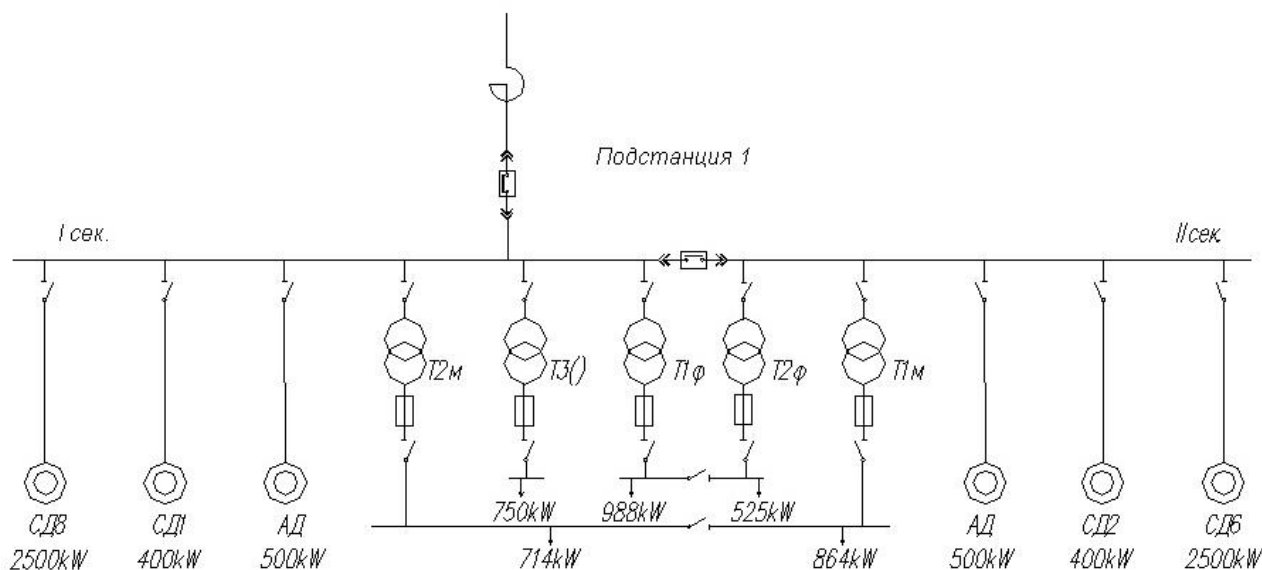
	Номинални параметри	Стойност на параметрите	
		Двигател тип СДМ 32-22-34-60 УХЛ4	Двигател тип СДС 19-56-40 УХЛ4
1.	Пълна номинална мощност S_H, kVA	1780	2780
2.	Реактивна номинална мощност $Q_H, kVAr$	780	1216
3.	Номинално напрежение, kV	6	6
4.	Номинален статорен ток, A	185	281
5.	Честота на въртене на ротора, $об / мин.$	100	150
6.	Номинална честота на захранващото напрежение Hz	50	50
7.	Номинален фактор на мощност $\cos \varphi_H$	0,9(капацитивен)	0,9(капацитивен)
8.	Коефициент на полезно действие, %	93,6	95,1
9.	Номинален възбудителен ток, A	290	225
10.	Номинално напрежение на възбуждане, V	147	162
	Номинални параметри	Стойност на параметрите	
		Двигател тип СДМ 32-22-34-60 УХЛ4	Двигател тип СДС 19-56-40 УХЛ4
11.	Синхронно индуктивно съпротивление по напречната ос $x_{dH}, o.e.$	1,18	1,707

12.	Загуби на активна мощност в статорната намотка при номинален възбудителен ток P_{CH}, kW	22,704	25,7
13.	Загуби на активна мощност във възбудителната намотка при номинален режим на работа P_{fH}, kW	30,02	27,641
14.	Активно съпротивление на фаза от статорната намотка, Ω	0,273	0,134
15.	Активно съпротивление на роторната намотка, Ω	0,357	0,546

Структурната схема на вътрешно електроснабдяване с напрежение 6 kV на промишления комплекс – обект на дисертационната работа е дадена на фигура 5.5.

Схемата на вътрешното електроснабдяване на отделните цехови подстанции (Подстанция № 1 до Подстанция № 8) е радиална.

На фигура 5.6. е дадена еднолинейна схема на „Подстанция № 1” и инсталираните мощности на потребителите, които се захранват от нея.



Фиг. 5.6. Еднолинейна схема на „Подстанция № 1”.

В преобладаващата част от научните публикации и литература се защитава тезата, че достатъчно мощните СД (с мощност от 250 kW и повече) е изгодно и икономически целесъобразно да се използват в качеството им на компенсиращи устройства, ако в предприятията има монтирани и се намират в експлоатация по технологични изисквания.

За проверка и оценка на състоятелността на тази теза се поставя задачата за изследване и предварителна оценка при какви случаи е целесъобразно да се използват СД като източници за КРМ в електрическите мрежи на потребителите.

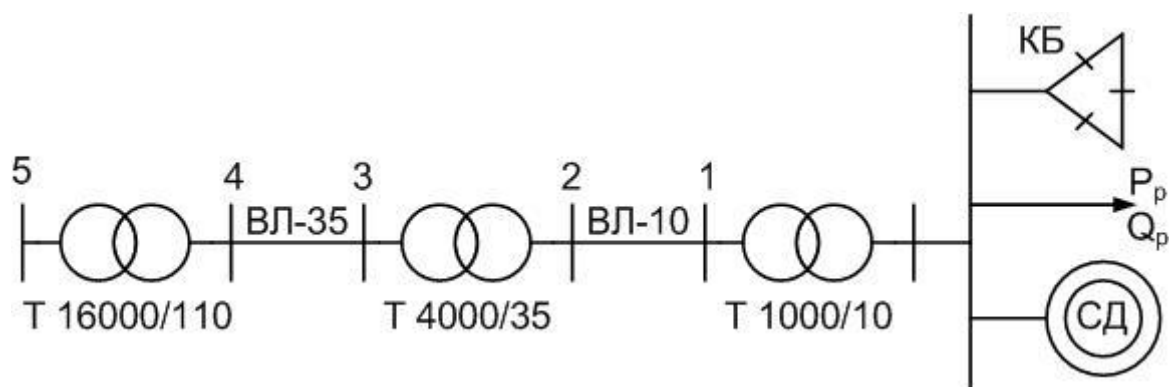
За решаване и изследване на поставената задача се използва схемата на електрическа мрежа със СД, представена на фиг. 5.7.

Необходимите изчисления за определяне на загубите на активна и реактивна мощност в мрежи със СД се изпълняват при следните изходни данни.

За представената схема на фиг. 5.7. е изпълнено изчисляване на загубите за четири режима на работа:

1. В мрежата, захранваща потребителите, липсват устройства за компенсиране на реактивната мощност (КРМ).
2. КРМ се осъществява само с помощта на СД (генериране на реактивна мощност от СД, равна на **96 kVar**).

3. КРМ се осъществява със СД и КБ (генериране на РМ от СД е 96 kVAr и от КБ - 320 kVAr).
4. КРМ се осъществява от КБ, генериращи РМ $Q_{\text{КБ}} = 420 \text{ kVAr}$.



Фиг. 5.7. Схема на електрическа мрежа със СД, използван като източник на реактивна мощност и използван за КРМ

Резултатите от изчисленията са представени в Таблица 5.11 Индексите на товарите и загубите от 1 до 5 съответстват на точките от мрежата, показани на фиг. 5.7.

От Таблица 5.11 следва, че общото потребление на реактивна мощност в точка 5 е по-голямо при КРМ с помощта на СД в сравнение с отсъствие на компенсацията.

От получените резултати е очевидно, че в дадената схема при зададена стойност на товара, компенсирането на реактивната съставляща на мощността е нецелесъобразно.

Както се вижда от Таблица 5.11, при по-висок $\cos\varphi$ е по-целесъобразно КРМ да се осъществява с помощта на КБ. Изчисленията показват, че в случай на пълна КРМ с използването на КБ, консумацията на активна мощност в точка 5 се намалява с повече от 3 kW , като в същото време при частична компенсация на РМ с използването на СД общите загуби на активна мощност се увеличават с повече от $1,5 \text{ kW}$. Следователно използването на СД като ИРМ не е изгодно при дадените стойности на консумираната мощност и параметрите на схемата.

Таблица 5.11.

	Без КРМ	КРМ със СД	δ_1	КРМ със СД + КБ	δ_2	КРМ с КБ	δ_3
P_H, kW	760	763,11	+3,11	764,00	+4,00	761,26	+1,26
$Q_H, kVar$	420	324,00	-96,00	4,00	-416,00	0,01	-419,99
S_H, kVA	868,3	829,04	-39,29	764,01	-104,32	761,26	-107,07
$\Delta P_1, kW$	10,47	10,01	-0,73	8,87	-1,87	8,82	-1,92
$\Delta Q_1, kVar$	55,47	51,8	-3,67	46,10	-9,37	45,87	-9,60
$P_{\Sigma 1}, kW$	770,7	773,12	+2,38	772,87	+2,13	770,08	-0,66
$Q_{\Sigma 1}, kVar$	475,7	375,8	-99,67	0,10	-425,37	45,88	-429,56
$S_{\Sigma 1}, kVA$	905,6	859,62	-45,99	774,49	-131,11	771,45	-134,15
$\Delta P_2, kW$	1,48	1,33	-0,15	1,08	-0,40	1,07	-0,40
$\Delta Q_2, kVar$	2,15	1,94	-0,21	1,57	-0,58	1,56	-0,59
$P_{\Sigma 2}, kW$	772,2	774,45	+2,23	773,95	+1,73	771,16	-1,06
$Q_{\Sigma 2}, kVar$	477,6	377,74	-99,88	51,68	-425,94	47,44	-430,18
$S_{\Sigma 2}, kVA$	907,9	861,66	-46,33	775,67	-132,32	772,61	-135,37
$\Delta P_3, kW$	7,03	6,85	-0,17	6,56	-0,47	6,55	-0,48
$\Delta Q_3, kVar$	51,46	49,92	-1,54	47,28	-4,18	47,19	-4,27
$P_{\Sigma 3}, kW$	779,2	781,31	+2,06	780,51	+1,26	777,71	-1,54
$Q_{\Sigma 3}, kVar$	529,8	427,66	-101,42	98,96	-430,12	94,64	-434,44
$S_{\Sigma 3}, kVA$	941,8	890,69	-51,19	786,76	-155,13	783,44	-158,44
$\Delta P_4, kW$	4,56	4,08	-0,48	3,18	-1,38	3,16	-1,41
$\Delta Q_4, kVar$	4,35	3,89	-0,46	3,03	1,31	3,01	-1,34
$P_{\Sigma 4}, kW$	783,1	785,39	+1,58	783,69	-0,12	780,86	-2,95
$Q_{\Sigma 4}, kVar$	533,2	431,55	-101,88	101,99	-431,4	97,64	-435,78
$S_{\Sigma 4}, kVA$	948,1	896,14	-51,96	790,30	-157,8	786,94	-161,16
$\Delta P_5, kW$	21,35	21,31	-0,04	21,24	-0,11	21,24	-0,11
$\Delta Q_5, kVar$	133,9	133,27	-0,63	132,10	-1,80	132,06	-1,83
P_{Σ}, kW	805,2	806,70	+1,54	804,94	-0,22	802,10	-3,06
$Q_{\Sigma}, kVar$	667,3	564,82	-102,51	234,09	-433,23	229,71	-437,62
S_{Σ}, kVA	1045,7	984,77	-60,98	838,28	-207,47	836,35	-211,41

Общите загуби на активна мощност на електротехническият комплекс при използваните режими на експлоатация и при управление режимите на експлоатация, които са изчислени аналитично са дадени в таблица 5.16.

Таблица 5.16.

Величини	Използвани режими на експлоатация (Таблица 5.12.)	При управление режимите на експлоатация (Таблица 5.13.)
	I-ва И II-ра групи СД	I-ва И II-ра групи СД
Загуби на активна мощност за производство и пренос на реактивна мощност, kW	29,33	5,88
Загуби на активна мощност за възбуждане, kW	22,022	21,12
Сумарни загуби на активна мощност, kW	51,352	26,99

В годишен аспект разходите на активна електрическа енергия за покриване на загубите в двата режима на работа са дадени в таблица 5.17. Приема се, че работното време в годината е равно на 90 % календарното (8 760 часа), т.е. 7 884 часа.

Таблица 5.17.

Величини	Използвани режими на експлоатация (Таблица V.11.)	При управление режимите на експлоатация (Таблица V.12.)
	I-ва И II-ра групи СД	I-ва И II-ра групи СД
Разход на електрическа енергия за покриване на загубите на активна мощност за производство и пренос на реактивна мощност, kWh	231 237,72	46 358
Разход на електрическа енергия за покриване на загубите на активна мощност за възбуждане, kWh	173 621,448	166 510
Сумарни разход на електрическа енергия за покриване на загубите на активна мощност kWh	404 859,17	212 868

Изследване режима на работа на синхронен двигател при управление режима на възбуждане.

За експериментално изследване на различните режими на работа на синхронните двигатели са направени контролни измервания на основните електрически параметри на синхронен двигател СДС 19-50-40-УХЛ4, № 8 (от

втората група). Измерванията са направени в три режима на възбуждане, както следва:

Режим 1. Установен режим на работа и стойност на възбудителния ток $I_f = 180 \text{ A}$ ($I_f = 225 \text{ A}$)

Режим 2. Намаляване на възбудителния ток с 10% от стойността на установения режим, до стойност $I_f = 162 \text{ A}$.

Режим 3. Увеличаване на възбудителния ток с 10% от стойността на установения режим, до стойност $I_f = 198 \text{ A}$.

Резултатите от изпълнените контролни измервания за определяне на общите загуби на активна мощност за производство и пренос на произведената реактивна за трите изследвани режими са дадени в таблица 5.20.

Таблица 5.20.

Величини	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Загуби на активна мощност за производство и пренос на реактивна мощност, kW	3,102	0,988	6,249
Загуби на активна мощност за възбуждане, kW	1,563	1,384	1,762
Сумарни загуби на активна мощност, kW	4,665	2,372	8,011

В годишен аспект разходите на активна електрическа енергия за покриване на загубите в трите режима на работа са дадени в таблица 5.21. Приема се, че работното време в годината е равно на 90 % календарното (8 760 часа), т.е. 7 884 часа.

Таблица 5.21.

Величини	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Разход на електрическа енергия за покриване на загубите на активна мощност за производство и пренос на реактивна мощност, kWh	24 456	7 789	49 267
Разход на активна електрическа енергия за възбуждане, kWh	12 322,69	10 911,46	13 891,61
Общи загуби на активна електрическа енергия, kWh	36 778,69	18 700,85	63 159

Изследване на разпределението на електрическата енергия в Подстанция № 1 при различни режими на възбуждане на синхронни двигатели СД 6 и СД 8.

Направено е контролно измерване на режимите на работа на електрическите консуматори, захранвани от Подстанция № 1, при три режима на възбуждане на синхронни двигатели СД 6 и СД 8 в продължение на 3 часа, както следва:

Режим 1. По време на първия час – Работа на синхронни двигатели СД6 и СД8 със стойности на възбудителните им токове, съответно $I_f = 170 \text{ A}$ и $I_f = 160 \text{ A}$.

Режим 2. По време на втория час – Работа на синхронни двигатели СД6 и СД8 със стойности на възбудителните им токове, съответно $I_f = 185 \text{ A}$ и $I_f = 175 \text{ A}$.

Режим 3. По време на третия час – Работа на синхронни двигатели СД6 и СД8 със стойности на възбудителните им токове, съответно $I_f = 196 \text{ A}$ и $I_f = 185 \text{ A}$.

Анализ на резултатите от измерванията.

1. По отношение на Режим 1. Режим 1 (Таблица 5.23.) на работата на двата синхронни двигателя СД 6 и СД 7 се характеризира с обща средна стойност на генерираната реактивна мощност от порядъка на $Q = 161 \text{ kVAr}$. Активната мощност, измерена в началото на кабела, захранващ Подстанция № 1 е $P = 7\,130 \text{ kW}$. Общата средна активна мощност, черпена от консуматорите за времето на измерването е $P = 7\,097,7 \text{ kW}$. Като се вземат предвид изчислителните загуби на мощност в токоограничаващия реактор и кабелната линия (Таблица 5.25.) с достатъчна за практически цели точност може да се твърди, че разликата в измерената стойност за активна мощност - $\Delta P = 32,3 \text{ kW}$, е вследствие на загубите в токоограничаващия реактор и захранващия кабел.

2. По отношение на Режим 2. Режим 2 на работата на двата синхронни двигателя СД 6 и СД 7 се характеризира с обща средна стойност на генерираната реактивна мощност от порядъка на $Q = 323,6 \text{ kVAr}$, т.е. два пъти повече. Активната мощност, измерена в началото на кабела, захранващ Подстанция № 1 е $P = 7\,370 \text{ kW}$, реактивната $Q = 2\,630 \text{ kVAr}$. Общата средна активна мощност, черпена от консуматорите за времето на измерването е $P = 7\,353,6 \text{ kW}$.

Разликите в измерените стойности за активна мощност - $\Delta P = 16,4 \text{ kW}$ са вследствие на загубите в токоограничаващия реактор и захранващия кабел.

От таблица 5.23. се вижда, че с увеличаване на генерираната от СД 6 и СД 8 реактивна мощност с приблизително 100 % се намалява консумираната реактивна мощност от захранващата мрежа със 100 kVAr , което е 3,8 %.

В този случай загубите на активна мощност в токоограничаващия реактор и захранващия кабел намаляват с 39,26 % в сравнение с режим 1, но се увеличават загубите на активна мощност за производство и пренос на реактивна с 21,8 % (Таблица 5.25.)

3. По отношение на Режим 3. Режим 3 на работата на двата синхронни двигателя СД 6 и СД 7 се характеризира с обща средна стойност на генерираната реактивна мощност от порядъка на $Q = 528,7 \text{ kVAr}$, което е повече

с 455% в сравнение с Режим 1 и с 163 % - в сравнение с Режим 2. Активната мощност, измерена в началото на кабела, захранващ Подстанция № 1 е $P = 7\,640\text{ kW}$, реактивната $Q = 2\,590\text{ kVar}$. Общата средна активна мощност, черпена от консуматорите за времето на измерването е $P = 7\,612,6\text{ kW}$.

Разликите в измерените стойности за активна мощност - $\Delta P = 27,4\text{ kW}$ са вследствие на загубите в токоограничаващия реактор и захранващия кабел.

По отношение на загубите за производство и пренос на реактивната мощност, произведена от синхронните двигатели от Таблица 5.23. се вижда, че в Режим 2 сумарната активна мощност, консумирана от СД 6 и СД 8 е с $3,4\text{ kW}$ повече в сравнение с Режим 1, в Режим 3 – $9,4\text{ kW}$ повече в сравнение с Режим 1 и 6 kW повече в сравнение с Режим 2.

В този случай, като се има предвид, че по време на измерването натоварването на синхронните двигатели не е променяно може да се твърди, че тази стойност се равнява на загубите за производство и пренос на произведената реактивна мощност от синхронните двигатели при различни режими на възбуждане и произвеждане на реактивна енергия.

Технико–икономическа оценка по отношение на контролни измервания в реални производствени условия.

От таблица 5.21. се вижда, че режима на работа на синхронен двигател СД 8 в режим 2 ще доведе до най – малък разход на електроенергия за покриване на загубите на активна мощност за производство и пренос на произведената реактивна, както и загубите във възбудителната намотка. Т.е. режим 2 в случая може да се приеме за оптимален режим на работа на двигателя.

В сравнение с режим 2, разходите за електрическа енергия в годишен аспект за режим 1 ще бъдат с 97 % повече, за режим 3 – 337 % повече.

Изследване на разпределението на електрическата енергия в Подстанция № 1 при различни режими на възбуждане на синхронни двигатели СД 6 и СД 8

На основание направения анализ, при това изследване се установи, че най малки загуби за производство и пренос на реактивна мощност се регистрират в Режим 2. Резултатите са дадени в Таблица 5.26.

Режим 1 се характеризира с по–малки загуби на активна мощност – $5,71\text{ kW}$ за производство и пренос на произведената реактивна, но загубите в захранващата линия са най – големи – $32,3\text{ kW}$.

Режим 2 се характеризира с по–големи загуби на активна мощност – $7,8\text{ kW}$ за производство и пренос на произведената реактивна, но загубите в

захранващата линия са най – малки – **16,4 kW**, което се дължи на намаляване консумацията на реактивна мощност от захранващата линия.

Режим 3 се характеризира с най – големи загуби на активна мощност – **11,3 kW** за производство и пренос на произведената реактивна. В този режим се очакваше активните загуби в захранващата линия да се понижат спрямо Режим 2, но вследствие включване на допълнителни консуматори, поради изискване на технологичния процес и увеличение на консумираната от мрежата активна мощност се наблюдава увеличение и на загубите на в кабелната линия, независимо, че намалява консумираната реактивна мощност с още **40 kVAr**.

При направеното Изследване на разпределението на електрическата енергия в Подстанция № 1 при различни режими на възбуждане на синхронни двигатели СД 6 и СД 8 се установи, че най оптималния режим на работа е Режим 2 (Таблица 5.26.).

Таблица 5.26.

Стойност на сумарни действителни загуби на активна енергия за подстанция 1 за 1 година			
T _Г =8760 ч.	К _{работа} =0,9		
Цена на активна ел. енергия - 110 лв./MWh (примерна)			
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
ΔP _{сд6} +ΔP _{сд8} , kW	5,71	7,8	11,3
Δ P захранваща линия, kW	32,3	16,4	27,4
Σ ΔP _{сд6} +ΔP _{сд8} + Δ P захранваща линия, kW	38,01	24,2	38,7
ΔE, MWh	299, 671	190, 793	305, 111
Стойност на загубите, лв.	32 964	20 988	33 562,21

В тази глава на дисертацията се разработва и практически метод за определяне режимите на възбуждане на група мощни синхронни двигатели.

Под термина „група синхронни двигатели” (ГСД) следва да се разбира съвкупност от най–малко два СД, използвани едновременно за компенсация на реактивната мощност в разпределителните пунктове на СЕПП.

За решаване на поставената задача загубите в синхронните двигатели, зависещи от режима на възбуждане ще се представят във вид на сума от две съставлящи

$$p = A\alpha^2 + B\alpha, \text{ kW} \quad (5.9)$$

където

$A\alpha^2$ - съставляща на загубите, която се изменя пропорционално на квадрата на реактивната мощност, kW ;

$B\alpha$ - съставлява на загубите, която се изменя пропорционално на първата степен на реактивната мощност, kW ;

$\alpha = \frac{Q_c}{Q_{c.H}}$ - относително натоварване на синхронния двигател по реактивна мощност;

Q_c - реактивна мощност, генерирана (консумирана) от синхронните двигатели, $kVAr$

$Q_{c.H}$ - номинална реактивна мощност на синхронните двигатели, $kVAr$

Стойностите на константите A и B са дадени в справочна литература или се изчисляват за всеки конкретен случай.

Пълните загуби на мощност, зависещи от режима на възбуждане на m групи двигатели с n_i на брой двигатели във всяка група за радиалната схема на захранване с един радиус, се представят във вида

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m (A_i \alpha_i^2 + B_i \alpha_i) n_i + \frac{c}{2} Q^2 + \lambda_0 Q, kW \quad (5.10)$$

където

c - постоянен параметър, характеризиращ увеличението на икономическия еквивалент на реактивната мощност на мрежата, определен с израза

$$c = 2.10^{-3} \sum \frac{r}{U^2}, kW / kVAr^2 \quad (5.11)$$

r - съпротивление на отделните елементи на радиалната мрежа [1], Ω ;

U - средно напрежение на елемента, kV ;

Q - реактивна мощност, консумирана от захранващата подстанция, $kVAr$;

λ_0 - икономически еквивалент на реактивната мощност в центъра на захранване на подстанцията, $kW/kVAr$;

Променливите α_i и Q_i в (5.9) са свързани помежду си с уравнение от вида

$$\varphi = Q_a - \sum_{i=1}^m \alpha_i Q_{c.Hi} n_i - Q = 0, \quad (5.12)$$

където

Q_a - средна стойност на реактивния товар на асинхронните двигатели, захранвани от подстанцията, $kVAr$.

Границите на изменение на променливите се определят, както следва

$$\alpha_{imin} \leq \alpha_i \leq \alpha_{imax} \quad (5.13)$$

$$Q_{min} \leq Q \leq Q_{max} \quad (5.14)$$

където $\alpha_{i \min}$, $\alpha_{i \max}$ - минимално и максимално допустими относителни стойности на реактивната мощност на синхронните двигатели;

$Q_{\min}$, $Q_{\max}$ - минимално и максимално допустими стойности на реактивната мощност, консумирана от подстанцията, kVAr

$\alpha_{i \min}$ - определя се от условията на топлинен режим на статора и по условието за устойчива работа [33];

$\alpha_{i \max}$ - определя се от условията на топлинен режим на статора и ротора

Стойността на $Q_{\max}$ се определя от условията: претоварване на мрежата, баланс на реактивните мощности в енергосистемата, осигуряване на напрежение в разпределителната подстанция не по-ниско от минимално допустимото за периода на максимален товар на енергосистемата; $Q_{\min}$ се определя от условието за осигуряване на напрежение в разпределителната подстанция не по-високо от максимално допустимото.

Решението на задачите за повишаване на икономичността на режимите на работа трябва да съответства на условието за минимум на пълните загуби (5.10) при изпълнение на условията от (5.12) до (5.14).

Чрез използване на метода на неопределените множители на Лагранж решението на дадената задача може да се свежда до намиране на минимума на функцията

$$\psi = p_{\Sigma} - \lambda \varphi, \quad (5.15)$$

където λ - неопределен множител.

Оптималните (най - икономичните) стойности на променливите α_i и Q_i , съответстващи на минимума на функцията (5.15), се определят от решенията на система $m + 2$ уравнения от вида

$$\frac{\partial \psi}{\partial \alpha_i} = 2A_i \alpha_i + B_i - \lambda Q_{C.Hi} = 0; \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Q} = cQ + \lambda_0 - \lambda = 0; \quad (5.17)$$

$$\varphi = Q_a - \sum_{i=1}^m \alpha_i Q_{C.Hi} n_i - Q = 0. \quad (5.18)$$

От от получените резултати за α_i се записва израза

$$\alpha_i = \frac{\lambda Q_{C.Hi} - B_i}{2A_i}; \quad (5.19)$$

$$Q = \frac{\lambda - \lambda_0}{c}. \quad (5.20)$$

След заместване и подходящо преобразуване за λ се получава израза

$$\lambda = a(Q_a - Q) + b, \text{ kW / kVAr} \quad (5.21)$$

където

$$a = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{Q_{C.Hi}^2}{2A_i} n_i}, \quad kW/kVar^2 \quad (5.22)$$

$$b = a \sum_{i=1}^m \frac{B_i}{2A_i} Q_{C.Hi} n_i, \quad kW/kVar \quad (5.23)$$

От изразите (5.21) - (5.23) се вижда, че:

1. a и b се явяват постоянни параметри, характеризиращи икономическите особености на групата синхронни двигатели, при което параметърът a характеризира нарастването на резултантния еквивалент на реактивната мощност, а b резултантния постоянен еквивалент.
2. Неопределения множител λ съответства на оптималната стойност на икономическия еквивалент на реактивната мощност на клемите на всичките m групи синхронни двигатели, захранвани от дадената подстанция.

За на оптимално използване на реактивната мощност на СД е целесъобразно да се реализира едновременно регулиране на всички двигатели, работещи в системата на електроснабдяване на промишленото предприятие (СЕПП).

При разработката на системата за управление на СД т да се отчитат следните основни изисквания:

- Основното предназначение на СД за задвижване на производствени агрегати трябва да доминира пред възможността за използването им като източници на реактивна мощност;
- Разпределението на реактивната мощност в ГСД трябва да осигурява оптимални резултати с отчитане на експлоатационните ограничения на СД и СЕПП;
- Алгоритъмът за управление трябва да допуска възможност за просто и надеждно техническо изпълнение и разширението на системата за управление в големи СЕПП;

В съответствие с изложените изисквания, системата за управление на ГСД трябва да бъде построена като йерархична, която съдържаща най – малко две нива:

- Първо, най–ниското ниво образуват индивидуалните регулатори на отделните синхронни двигатели (РСД), всеки от които управлява

възбудителния ток на СД на основата на достъпни за измерване променливи на състоянието на СД и зададената от регулатора в разпределителната подстанция (РРП) стойност на реактивната мощност Q_c ;

- Второто ниво се създава с РРП, осигуряващ оптимално разпределение на реактивната мощност между всичките СД в групата, които получават захранване от дадена разпределителна подстанция (РП).

Изводи към Глава 5:

1. За минно-обогадителен комплекс в експлоатация е обобщена и представена информация за схемата на електроснабдяване, инсталираните мощности, кабелните линии и техническата характеристика на използваните синхронни двигатели за задвижването на различни машини и агрегати.

2. За синхронните двигатели в експлоатация са изпълнени контролни измервания и изчисления за различни режими на работа. Получените резултати са обобщени и представени в Таблицы и графични зависимости.

3. Установено е, че всички СД в експлоатация работят с отворена система за управление на възбуждането, т.е. с постоянен възбудителен ток. Този режим осигурява устойчива работа на СД само за изпълнение на основните му функции, за които е предназначен, а именно: сигурно и надеждно пускане, устойчиво задвижване и работа на определен производствен агрегат или машина. Едновременно с това трябва да се посочи, че в този режим на работа СД генерират излишно количество реактивна мощност с много висока цена.

4. Чрез решаването на конкретни числени примери е направена оценка при какви условия е целесъобразно използването на СД като източници за КРМ в електрическите мрежи на промишлени обекти.

Тази предварителна оценка се явява задължителен етап при обосноваването и избора на решение за използване на СД за управление енергийната ефективност на промишлен обект.

5. Изследвано е взаимното влияние между паралелно работещи СД, захранвани от една шинна система.

Установено е, че паралелното включване на няколко СД към една шинна система води до съществено повишаване на загубата на мощност в тях, свързана с генерирането на реактивна мощност. Повишението на загубата на мощност е сравнено с изчислените стойности по паспортни данни.

6. За решаването на поставената задача с отчитане на изложените проблеми в качеството на вариант за оптимално разпределение на реактивната мощност (РМ) между СД е разгледана и решена задачата за оптимизация по

критерия за минимална стойност на топлинното натоварване на СД при осигуряване на необходимата степен на компенсиране на реактивната мощност и при изпълнение на необходимите технически ограничения.

Тази целесъобразност се определя от факта, че отпада необходимостта от провеждането на предварителни експерименти в електроразпределителната мрежа на обекта с цел уточняване стойностите на коефициентите D_{1i} и D_{2i} , тъй като те не влизат в целевата функция.

Важно е да се отбележи, че критерия за минимум на топлинните загуби в СД не противоречи на критерия за минимума на загубите на активна мощност.

7. Минимизирането на топлинното натоварване на СД при точно зададена стойност на активния товар води до увеличаване на междуремонтния период на статора и ротора, което има също положително финансово измерение.

8. Предложен е метод за определяне режима на възбуждане на група мощни синхронни електродвигатели по условието за минимални загуби на енергия за сложна, силно разклонена схема за електроснабдяване на промишлен обект.

9. За осигуряване на ефективно използване на СД като източници на реактивна мощност е необходимо да се осигури възможност за едновременно регулиране (управление) на всички СД, които са включени към електроразпределителната мрежа на изследвания промишлен обект.

За реализиране на задачата за повишаване на енергийната ефективност на промишлен обект чрез оптимизация на разпределението на реактивната мощност между група мощни синхронни двигатели се предлага да се използва метода на декомпозицията, който се свежда до използването на йерархична структура на система за управление с две нива:

- Първо ниво – включва индивидуални регулатори за управление на всеки синхронен двигател.

- Второ ниво – включва общ регулатор за всички синхронни двигатели, които са включени към една шинна система, осигуряващ оптималното разпределение на реактивната мощност между всички СД, включени в групата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основните резултати на дисертацията се обобщават в научно-приложни и приложни приноси.

А) Научно-приложни приноси

1. На основата на общата теория на синхронните електрически машини са получени аналитични зависимости, които осигуряват възможност за изследване и анализ за работата на синхронните електродвигатели при различни режими на

работа, закони на управление и параметри на захранващата електрическа мрежа.

2. В резултат на проведеното изследване за влиянието на напрежението на захранващата мрежа на компенсиращата способност на синхронните двигатели, е установено, че при зададени стойности на коефициента за натоварване на СД по реактивна (α) и активна (β) мощност, минималните стойности на загубите на мощност в статорната намотка, в статорната намотка и във възбудителната намотка се получават при различни стойности на напрежението на захранващата мрежа.

3. Изследвано е влиянието на мощността на силовите трансформатори на ефективното използване на синхронните двигатели като източници на реактивна мощност.

Предложен е аналитичен израз за определяне на реактивната мощност, която е възможно да бъде предадена от страна на 6 (10) kV на страна 0,4 kV при зададен брой и параметри на силовите трансформатори.

4. За повишаване на енергийната ефективност на система за електрозадвижване със синхронни електродвигатели са изследвани, обосновани и предложени:

4.1. Метод за оптимизация на потокосцеплението на статорната намотка на СД;

4.2. Метод за определяне на закона за регулиране на напрежението на статора на синхронен двигател при честотно управление, осигуряващ постоянна претоварваща способност на СД, работещ с $\cos \varphi = 1$.

5. Получен е математически модел за решаване на оптимизационна задача за определяне на оптималната комбинация на параметрите на въздушен електропровод (сечение, ниво на напрежението и мощността на компенсиращото устройство), осигуряваща най-голям икономически ефект при пренасяне на електрическата енергия.

6. Определен е закона за регулиране на група синхронни двигатели, осигуряващи поддържането на зададена стойност на реактивната мощност на границата на електроразпределителното дружество (доставчика) и потребителя (промишлен обект) при следните условия:

- за един разпределителен възел, от който се захранва група синхронни двигатели;

- за сложна система за електроснабдяване, съдържаща няколко разпределителни възела.

7. Обосновани са методи за оптимизация режима на работа на група мощни синхронни двигатели:

7.1. Метод на относителните нараствания;

7.2. Метод за минимална стойност на активните загуби;

7.3. Практически метод за определяне режима на възбуждане на група мощни синхронни двигатели.

8. За оптимално разпределение на реактивната мощност между група мощни синхронни двигатели е разгледана и решена задачата за оптимизация по критерия за минимална стойност на топлинното натоварване на СД при осигуряване на необходимата степен на компенсиране на реактивната мощност и при изпълнение на необходимите технически ограничения.

Б) Приложни приноси

1. За минно-обогатителен комплекс в експлоатация е обобщена и представена информация за схемата на електроснабдяване, инсталираните мощности, кабелните линии и техническата характеристика на използваните синхронни двигатели за задвижването на различни технологични процеси.

2. За синхронните двигатели в експлоатация са изпълнени контролни измервания и изчисления за различни режими на работа. Получените резултати са обобщени и представени в Таблицы и графични зависимости.

3. Установено е, че всички СД в експлоатация работят с отворена система за управление на възбуждането, т.е. с постоянен възбудителен ток. Този режим осигурява устойчива работа на СД само за изпълнение на основните му функции, за които е предназначен, а именно: сигурно и надеждно пускане, устойчиво задвижване и работа на определен производствен агрегат или машина. Едновременно с това трябва да се посочи, че в този режим на работа СД генерират излишно количество реактивна мощност с много висока цена.

4. Чрез решаването на конкретни числени примери е направена оценка при какви условия е целесъобразно използването на СД като източници за КРМ в електрическите мрежи на промишлени обекти.

5. За осигуряване на ефективно използване на СД като източници на реактивна мощност е необходимо да се осигури възможност за едновременно регулиране (управление) на всички СД, които са включени към електроразпределителната мрежа на изследвания промишлен обект.

За реализиране на задачата за повишаване на енергийната ефективност на промишлен обект чрез оптимизация на разпределението на реактивната мощност между група мощни синхронни двигатели се предлага да се използва метода на декомпозицията, който се свежда до използването на йерархична структура на система за управление с две нива:

➤ Първо ниво – включва индивидуални регулатори за управление на всеки синхронен двигател.

➤ Второ ниво – включва общ регулатор за всички синхронни двигатели, които са включени към една шинна система, осигуряващ

оптималното разпределение на реактивната мощност между всички СД, включени в групата.

6. Определени са условията, при които не е целесъобразно да се използва даден разпределителен възел за оперативно регулиране на реактивната мощност.

Определени са условията и местата, в които трябва да се монтират устройства за програмно управление на възбуждането на група мощни синхронни двигатели ДС [1, 2].

7. За оценка ефективността на използване на СД като източници на реактивната мощност е определен диапазона на изменение на разполагаемата реактивна мощност при следните условия:

- за различни типове синхронни двигатели;
- при различни условия на работа на СД;
- при различни параметри на захранващата мрежа;
- с отчитане на допълнителните загуби в СД, свързани с генерирането на реактивна мощност.

СПИСЪК на публикациите по темата на дисертацията

1. Цоцорков Л. Д., Е. Р. Кърцелин, В. И. Дворников, Н. С. Минеков. Енергиен подход за избор на транспортна система при разработване на рудник „Асарел” в дълбочина. Сборник с доклади „X – та. Юбилейна национална конференция с международно участие по открит и подводен добив на полезни изкопаеми. 07. до 11. юни 2009 г., Варна;
2. Кърцелин Е. Р., Н. С. Минеков. Изследване факторите влияещи върху електрозахранването на основните товарачни машини в рудник „Асарел”. Год. МГУ „Св. Иван Рилски”, Том 52, секция: Механизация, електрификация и автоматизация на мините. София 2009 г.;
3. Кърцелин Е. Р., Н. С. Минеков, Р. Исталиянов, Й. Младенова. Изследване влиянието на напрежението върху загубите на енергия в синхронни електродвигатели. Год. МГУ „Св. Иван Рилски”, Том 52, секция: Механизация, електрификация и автоматизация на мините. София 2009г.;
4. Минеков Н. С., Р. Исталиянов, И. Йочев, И. Проданов, Й. Младенова, Н. Лаков. Определяне компенсиращата способност на синхронни двигатели с отчитане влиянието на напрежението на захранващата мрежа. Год. на Минно – геоложки университет „Св. Иван Рилски”, Том 53, св. III Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2010 г.;
5. Кърцелин Е., Й. Младенова, Р. Исталиянов, И. Проданов, И. Йочев, Н. Минеков. Влияние на висшите хармоници на режима на работа на трифазни електрически машини. Год. на Минно – геоложки университет „Св. Иван Рилски”, Том 53, св. III Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2010 г.;
6. Кърцелин Е. Р., Н. С. Минеков. Повишаване на енергийната ефективност на промишлени предприятия. Оптимизация на възбуждането на група мощни синхронни двигатели. Първо издание. София, Издателска къща „Св. Иван Рилски” – Минно–геоложки университет, 2010 г.;
7. Минеков Н. С. Оптимизация на възбуждането на група мощни синхронни двигатели. Год. на Минно–геоложки университет „Св. Иван Рилски”, Том 54, св. III Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2011 г.