

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

ЛЫСЕНКО Анатолий Тимофеевич

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
В ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Специальность 05.14.02 - Электрические станции,
(электрическая часть),
сети, электроэнергетические
системы и управление ими

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Институте электродинамики АН Украины

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент АН Украины
В.Г.Кузнецов

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
В.В.Зорин

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник
Г.Г.Панченко

Ведущая организация – ППКИ “Киевпромэлектропроект”
корпорации Укрмонтажспецстрой

Защита диссертации состоится “ 9 ” июня 1993 года
в 11⁰⁰ час. на заседании специализированного совета Д 016.30.04
при Институте электродинамики АН Украины по адресу:
252880, г.Киев-57, просп. Победы, 58, тел. 446-91-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электродинамики АН Украины,

Автореферат разослан “ 7 ” мая 1993 г.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00815133 (L)

Ученый секретарь
специализированного совета

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Г.М.Федоренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Снижение потерь и повышение качества электроэнергии (КЭ) продолжают оставаться актуальными проблемами на всех иерархических уровнях современных электроэнергетических систем. Это связано как с дефицитом топливно-энергетических ресурсов, так и с непрерывным увеличением удельного веса и единичных мощностей различных искажающих потребителей, в частности, электротехнологических несимметричных нагрузок (НН).

Известно, что наиболее эффективным способом снижения потерь мощности и электроэнергии является оптимальная компенсация реактивной мощности (КРМ), а наиболее целесообразным способом повышения КЭ в системах электроснабжения (СЭС) с НН является применение статических симметрирующих устройств. При этом и компенсирующие, и симметрирующие устройства могут быть реализованы с помощью одинаковых силовых реактивных элементов — реакторов и конденсаторных батарей.

Однако экономическая задача компенсации реактивной мощности (РМ) и техническая задача снижения несимметрии напряжений даже в сетях одного уровня рассматривались, как правило, отдельно. Так, большинство директивных материалов и научных разработок в области КРМ ограничиваются решениями задачи для режима прямой последовательности основной частоты; применение этих существующих рекомендаций для СЭС с НН может не только не улучшить, но и ухудшить показатели КЭ. При рассмотрении же задачи симметрирования режима условия по РМ используются лишь в качестве дополнительного ограничения, что не является оптимальным, а в отдельных случаях вообще не учитываются.

Проведенные исследования и реальная ситуация в системах электроснабжения стран бывшего СССР не дают основания считать решенными как задачу КРМ, так и задачу повышения КЭ. Это обусловлено не только недостаточной оснащенностью компрессирующими и симметрирующими устройствами и недостаточным контролем за показателями КЭ, но и отсутствием увязки результатов решения задач КРМ и симметрирования режима, то есть их относительной независимостью при исходной постановке.

Анализ литературных источников показывает, что совместному комплексному рассмотрению задач КРМ и симметрирования режимов, в частности, для промышленных СЭС, уделено недостаточное внимание, что приводит к снижению экономического эффекта от использования компенсирующих и симметрирующих устройств.

Исследования по диссертационной работе выполнялись в соответствии с координационным планом НИР Научного Совета АН УССР по комплексной программе "Научные основы электроэнергетики" (1985-1991 г.г.); планами НИР УССР по Постановлениям Президиума АН УССР: 0.01.11 "Коррекция", № ГР 81097994 ; 0.017113.Ц(0.Ц.003) "Компенсация", № ГР 81097993; "Совместимость", № ГР 01.84.0 047288; "Норма", № ГР 01.86.0 083872; программой 5.1.5 "Управление режимами систем электроснабжения как эффективный способ решения проблемы энергосбережения и ресурсосбережения", утвержденной ГКНТ Украины (Постановление № 12 от 04.05.1992 г.) по проекту "Разработка методов и средств компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии в промышленных системах электроснабжения".

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методов и средств оптимальной компенсации реактивной мощности в промышленных системах электроснабжения с несимметричными нагрузками. Исходя из поставленной цели, в работе были рассмотрены и решены следующие задачи:

1. Формирование общей математической модели оптимальной КРМ в промышленной СЭС с НН и ее модификаций в зависимости от постановки задачи и накладываемых ограничений на ее решение.
2. Исследование режимов, описание и анализ энергетических процессов в трехфазных сетях с несимметричными нагрузками.
3. Разработка математических моделей симметрокомпенсирующих устройств (СКУ), являющихся основой формирования экономической модели КРМ в СЭС с НН, и имеющих самостоятельное значение при решении задач анализа и синтеза схем СКУ.
4. Разработка структурно-функциональных схем автоматического управления режимами СКУ для изменяющихся НН.
5. Разработка методов, методик и алгоритмов решения задачи оптимального выбора мест установки и параметров устройств КРМ, обеспечивающих требуемую компенсацию РМ и допустимый уровень несимметрии напряжений в промышленных СЭС с НН.

Методы исследований. Для решения поставленных в работе задач использовались классические методы анализа и оптимизации режимов многофазных электрических систем, методы симметричных составляющих и пульсирующих мощностей, методы анализа и синтеза фазопреобразовательных цепей.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

- установлены все возможные варианты математических соотношений для пульсирующей мощности трехфазной системы и ее составляющих;
- получены общие выражения для параметров СКУ в зависимости от составляющих пульсирующей мощности трехфазной системы, как для случая исходной симметрии, так и несимметрии питающих напряжений;
- определены аналитические зависимости для установленной мощности СКУ, являющиеся основой при моделировании оптимизационных задач КРМ в СЭС с несимметричными нагрузками;
- сформирована и исследована целевая функция приведенных затрат на КРМ и симметрирование режима и ее модификации в зависимости от постановки задачи и накладываемых ограничений на ее решение;
- рассмотрена и решена задача выбора СКУ по критериям минимума приведенных затрат и минимума установленной мощности;
- предложена методика и алгоритм оптимального выбора и управления режимом конденсаторных батарей (БК) в СЭС с НН;
- разработаны новые эффективные структурные функциональные схемы автоматического управления симметрокомпенсирующими устройствами.

Автор защищает:

1. Результаты анализа энергетических процессов в трехфазных трехпроводных СЭС с несимметричными нагрузками.
2. Математические модели СКУ, обеспечивающих требуемую компенсацию РМ и симметрирование режима сети с НН.
3. Графоаналитический метод анализа и синтеза схем СКУ.
4. Методику и алгоритм выбора СКУ по критериям минимума приведенных затрат и установленной мощности.
5. Структурно-функциональные схемы автоматического управления индуктивно-емкостными и емкостными СКУ.
6. Инженерную методику расчета емкостных дискретно регулируемых СКУ и алгоритм управления их элементами.

Практическая ценность работы определяется созданием инженерных методов выбора мест установки, параметров, алгоритмов и схем управления устройств КРМ, обеспечивающих оптимизацию режима СЭС с несимметричными электротехнологическими нагрузками. Полученные автором результаты позволяют:

- автоматизировать выбор схем и параметров устройств КРМ в промышленных СЭС с НН с использованием как критерия минимума установленной мощности, так и критерия минимума приведенных затрат;

- определять значения входной РМ в узлах городских и промышленных СЭС с несимметричными потребителями;

- разработать и создать алгоритмы и блоки автоматического управления устройствами КРМ, обеспечивающие оптимизацию режима СЭС.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в директивных документах бывшего СССР (инструктивных материалах Главгосэнергонадзора) по компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий; при разработке и внедрении рекомендаций по компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения Коломенского завода тяжелого станкостроения и Киевского опытного завода "Беста", а также при разработке, создании и внедрении симметрокомпенсирующих устройств для группы индукционных печей на Руставском заводе "АвтоВАЗагрегат" и для группы установок электрошлакового переплава на Мариупольском металлургическом комбинате "Азовсталь".

Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований и разработок составил 179,1 тыс.руб., ожидаемый годовой экономический эффект 185,0 тыс.руб. На долю автора приходится соответственно 26,7 тыс.руб. и 41,2 тыс.руб. (в масштабе цен 1989 г.).

Апробация работы. Основные положения и материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и семинарах: IV Республиканской научно-технической конференции "Современные проблемы энергетики", г.Киев, 1985 г.; научно-технической конференции "Управление развитием и функционированием систем электро снабжения", г.Киев, 1986 г.; Республиканском научно-техническом семинаре "Повышение качества и эффективности использования электрической энергии", г.Киев, 1987 г.; V-й научно-технической конференции "Технико-экономические проблемы оптимизации режимов электропотребления промышленных предприятий", г. Миасс, 1989 г.; XI-й сессии Всесоюзного научного семинара АН УССР "Кибернетика электрических систем" по тематике "Электроснабжение промышленных предприятий", г.Абакан, 1989 г.; Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности и качества электроснабжения", г.Мариуполь, 1990 г.; научно-технической конференции "Актуальные проблемы электроэнергетики", г.Севастополь, 1991 г.; международной научной конференции "Качество электрической энергии", Польша, г.Спала, 1991 г.; научно-техническом семинаре "Энергосбережение и автоматизация проектирования электрохозяйства промышленных предприятий" г.Москва, 1991 г.; Второй

научно-технической конференции "Электромагнитная совместимость технических средств", г. Санкт-Петербург, 1992 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 работы, в том числе 4 отчета по законченным НИР ("Коррекция", "Компенсация", "Совместимость", "Норма"), 16 статей и 2 авторских свидетельства СССР на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы, приложения и содержит 154 страниц основного машинописного текста, 46 рисунков на 25 страницах, 11 таблиц на 7 страницах, список литературных источников из 175 наименований на 20 страницах и 17 страниц приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель, отражены научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и публикации основных результатов исследований и дано краткое описание работы.

В первой главе дана характеристика современного состояния исследований в области компенсации РМ и симметрирования режимов электрических сетей и систем. Проанализированы известные способы и средства КРМ, методы решения задач в области КРМ. Описаны отрицательные последствия при ухудшении показателей КЭ, дана краткая классификация и обзор методов и средств коррекции несимметричных режимов сетей. Рассмотрены особенности КРМ в промышленных СЭС с НН, и поставлены задачи исследований.

Проведенный анализ литературных источников показал, что в настоящее время отсутствуют, с одной стороны, эффективные методы расчета оптимальной КРМ в сетях с НН, а, с другой, - корректные способы учета условий и ограничений по РМ при решении задач симметрирования.

Наиболее целесообразным является совместное (комплексное) решение задач КРМ и симметрирования режимов в промышленных СЭС с НН, обеспечивающее минимум приведенных затрат. При постановке задачи исходными являются следующие данные: схема и параметры сети 6-10 кВ (включая цеховые трансформаторы), а также нагрузки расчетные для максимального режима (при проектировании) либо фактические (при эксплуатации) с учетом оптимально выбранных компенсирующих устройств (КУ) для симметричных нагрузок. При этом

принимается во внимание : а) ограничения энергосистемы по входной РМ на границе раздела балансовой принадлежности; б) требования ГОСТ 13109-87 на КЭ ; в) ограничения пропускной способности передающих элементов СЭС. В результате должны быть определены места установки, мощности и параметры статических устройств КРМ (КУ или КУ), соответствующие оптимальному потокораспределению РМ в СЭС, то есть обеспечению вышеуказанных ограничений при минимальных приведенных затратах.

Общая математическая модель данной оптимизационной задачи формулируется принципиально так же, как и для случая симметричной КРМ, в виде минимизируемой целевой функции (ЦФ) приведенных затрат

$$Z = Z_y + Z_n \rightarrow \min, \quad (1)$$

где Z_y , Z_n - затраты соответственно на устройства КРМ и на возмещение потерь активной мощности в СЭС. Однако затраты на устройства в этом случае состоят из следующих трех слагаемых:

$$Z_y = Z_{yH} + Z_{yB} + Y_{KЭ} \cdot \quad (2)$$

Здесь Z_{yH} , Z_{yB} - приведенные затраты на устройства КРМ (состоящие в общем случае из емкостных и индуктивных элементов) напряжением до 1 кВ и свыше 1 кВ; $Y_{KЭ}$ - ежегодный экономический ущерб от снижения КЭ. Затраты на низковольтные и высоковольтные устройства определяются по выражениям:

$$Z_{yH} = s_{KH} Q_{KH\Sigma} + s_{LH} Q_{LH\Sigma}; \quad Z_{yB} = s_{KB} Q_{KB} + s_{LB} Q_{LB}, \quad (3)$$

где $Q_{KH\Sigma}$, $Q_{LH\Sigma}$ - суммарные установленные мощности соответственно емкостных и индуктивных элементов всех низковольтных устройств КРМ; s_{KH} , s_{LH} - удельные приведенные затраты на низковольтные емкостные и индуктивные элементы устройств; Q_{KB} , Q_{LB} , s_{KB} , s_{LB} - то же для элементов высоковольтного устройства.

Затраты на возмещение потерь активной мощности в СЭС ΔP , определяемые как $Z_n = c_o \Delta P$ (c_o - удельная стоимость потерь мощности) для несимметричного режима зависят от токов как прямой, так и обратной последовательностей и в общем случае могут представляться через некоторую квадратичную функцию потерь, зависящую от РМ каждого из устройств КРМ Q_i (i - номер нагрузочного узла). При этом для СЭС напряжением U_i в i -й ветви сопротивлением R_i , по которой протекает ток, симметричные составляющие которого равны I_i' и I_i'' , потери активной мощности представляются зависимостью:

$$\Delta P_l = 3(I_l'^2 + I_l''^2) R_l = \frac{1}{U_l^2} f_{II}(Q_{Yl}^2) . \quad (4)$$

В промышленных СЭС, как известно, реально возможен учет только электромагнитной составляющей ущерба от снижения КС. При этом ущерб от несимметрии напряжений не зависит от потребляемой нагрузками РМ и в связи с этим при расчетах КРМ может не учитываться. Вместе с тем, оптимальное потокораспределение РМ в СЭС с НН зависит от допустимых значений почазателей КЭ и может отличаться от симметричного нагрузочного режима ввиду наличия в минимизируемой ЦФ дополнительных составляющих затрат на устройства и потери мощности. Тем самым ущерб от несимметрии, обусловленной нагрузкой, будет учитываться косвенно.

Во второй главе исследованы режимы и описаны энергетические процессы в промышленных СЭС при наличии НН, рассмотрены вопросы анализа и синтеза схем СКУ, а также построения алгоритмов и схем автоматического управления ими.

На основе анализа обобщенных уравнений несимметричных нагрузок и устройств в трехфазных сетях получены следующие зависимости для пульсирующей мощности:

$$\begin{aligned} \dot{N} &= N e^{j\tau} = \alpha_1 + j\rho_1 = -(\alpha^2 \dot{S}_{AB} + \dot{S}_{BC} + \alpha \dot{S}_{CA}) = \dot{S}_{c(BC)} - \dot{S} = \\ &= 3\dot{S}_A - \dot{S} = 2\dot{S}_A - \dot{S}_B - \dot{S}_C , = j\sqrt{3}(\dot{S}_B - \dot{S}_C) . \end{aligned} \quad (5)$$

где \dot{S} , $\dot{S}_{c(BC)}$ - сопряженные комплексы соответственно полной мощности и мощности эквивалентной трехфазной нагрузки (при выделении эквивалентной однофазной нагрузки, подключенной на напряжение \dot{U}_{BC}); \dot{S}_{AB} , \dot{S}_{BC} , \dot{S}_{CA} , \dot{S}_A , \dot{S}_B , \dot{S}_C - сопряженные комплексы соответствующих линейных и фазных мощностей; $\alpha = e^{j2\pi/3}$ - фазовый оператор. Действительная и мнимая составляющие пульсирующей мощности трехфазной системы определяются через активные и реактивные мощности однофазных (межфазных) нагрузок согласно выражениям

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= -P_{BC} + \frac{1}{2}(P_{AB} + P_{CA}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(Q_{AB} - Q_{CA}); \\ \rho_1 &= Q_{BC} - \frac{1}{2}(Q_{AB} + Q_{CA}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(P_{AB} - P_{CA}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

или через фазные мощности:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 2P_A - P_B - P_C = \sqrt{3}(Q_B - Q_C); \\ \rho_1 &= Q_B + Q_C - 2Q_A = \sqrt{3}(P_B - P_C). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Общие выражения для параметров СКУ в зависимости от действительной и мнимой составляющих пульсирующей мощности трехфазной системы имеют вид :

$$\left. \begin{aligned} Q_{ABY} &= \frac{Q_y}{3} + \frac{1-k}{3} (\beta_f - \sqrt{3} \alpha_f) ; \\ Q_{BCY} &= \frac{Q_y}{3} + \frac{1-k}{3} (-2\beta_f) ; \\ Q_{CAy} &= \frac{Q_y}{3} + \frac{1-k}{3} (\beta_f + \sqrt{3} \alpha_f) , \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

или -

$$Q_{my} = \frac{1}{3} (Q_y + N_k k_{\tau(m)}) . \quad (9)$$

Здесь $Q_y = Q_0 - \sum_m Q_m$ - РМ, обусловленная устройством, определяемая исходя из заданного баланса Q_0 в рассматриваемом узле сети ($m = AB, BC, CA$ - индекс фазы); k - коэффициент частичного симметрирования, представляющий собой отношение допустимой пульсирующей мощности $N_{доп}$, соответствующей допустимой (по ГОСТ 13109-87) несимметрии напряжений в рассматриваемом узле трехфазной сети, к пульсирующей мощности нагрузки, то есть $k = N_{доп}/N$; $N_k = N - N_{доп}$ - пульсирующая мощность, компенсируемая устройством до допустимого ее уровня; $k_{\tau(m)}$ - коэффициент, зависящий от аргумента пульсирующей мощности устройства τ_y (или нагрузки τ_m ; $\tau_y = \tau_m \pm \pi$) и определяемый выражениями

$$k_{\tau(AB)} = 2\sin(\frac{\pi}{3} - \tau_y); \quad k_{\tau(BC)} = 2\sin(\pi - \tau_y); \quad k_{\tau(CA)} = 2\sin(-\frac{\pi}{3} - \tau_y). \quad (10)$$

Другие формы записи выражений для параметров СКУ, получаемые при подстановке в (8) выражений (6) и (7) могут быть обусловлены постановкой задачи (при расчетах), удобством измерения тех или иных фазных или линейных мощностей (в условиях эксплуатации), а также наличием соответствующих датчиков мощностей (при разработке алгоритмов и схем управления).

На основе системы уравнений (8) предложен графоаналитический метод определения областей функционирования схем СКУ в трехмерном пространстве, осями которого являются обусловленные устройством РМ и составляющие пульсирующей мощности Q_y, α_y, β_y (рис.1). Получены аналитические соотношения параметров и сформулирован алгоритм определения границ областей функционирования соответствующих схем СКУ.

Система уравнений (8) при ее представлении через реактивные проводимости легла в основу структурной функциональной схемы автоматического управления СКУ. Отличительными особенностями последней

являются универсальность (так как алгоритм управления строится исходя из составляющих пульсирующей мощности) и возможность изменения заданной степени симметрирования. Это позволяет варьировать как требуемыми допустимыми значениями результирующего коэффициента обратной последовательности напряжений, так и значениями минимально необходимой установленной мощности СКУ. На предложенное техническое решение получено авторское свидетельство 1497681 СССР, МКИ³ Н 02 J 3/26.

Получены условия реализации емкостных устройств для симметрирования режима сети. При этом определены: а) максимальная пульсирующая мощность нагрузки, которая может быть скомпенсирована до величины, соответствующей допустимой несимметрии напряжений, с помощью БК известной мощности; б) минимально необходимая РМ БК, достаточная для симметрирования с заданной степенью нагрузки с известными (постоянными или изменяющимися) параметрами.

Третья глава посвящена постановке, исследованию и решению задачи оптимальной КРМ в промышленных СЭС с НН. Сформулирована ЦФ приведенных затрат на КРМ и симметрирование режима и накладываемые ограничения на решение задачи с учетом ее модификаций. Рассмотрены основные составляющие ЦФ - затраты на устройства КРМ (КУ и СКУ) и на возмещение потерь активной мощности в СЭС с НН.

Основой для анализа установленной мощности СКУ, и соответственно, затрат на устройства КРМ, является представление в трехмерном пространстве областей функционирования схем СКУ (рис.1). При фиксированной величине генерируемой устройством РМ $\gamma_y = -Q_y$ эти области изображаются в виде проекции на комплексной плоскости (рис.2).

Исследованы зависимости установленной мощности СКУ от всех влияющих на нее составляющих и получены аналитические выражения, обеспечивающие формирование ЦФ при оптимизационных расчетах КРМ в СЭС с НН с использованием как критерия минимума установленной мощности, так и критерия минимума приведенных затрат.

Установленная мощность СКУ, определяемая как $S_{уст} = \sum_n |Q_{ny}|$, в случае НН с неизменными параметрами представляется зависимостью:

$$S_{уст} = \frac{1}{3} |N_k k_{то} - \gamma_y| + N_k \sqrt{-k_{то}^2/3 + 4/3}, \quad (11)$$

а мощности индуктивных и емкостных элементов СКУ соответственно равны :

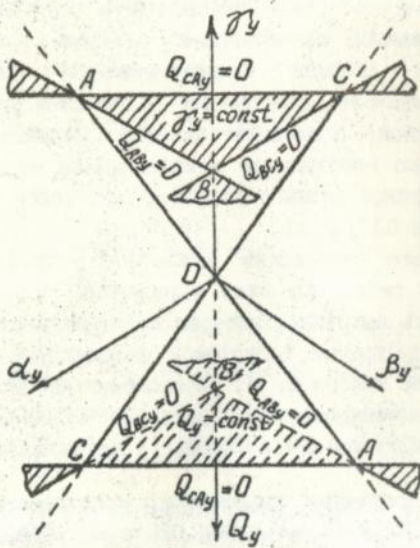


Рис. 1

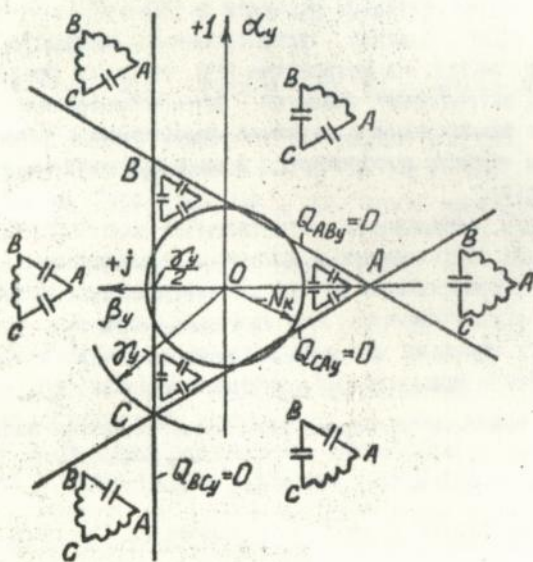


Рис. 2

$$\left. \begin{aligned} Q_L &= -\frac{\gamma_y}{2} + \frac{1}{5} | N_K k_{\tau 0} - \gamma_y | + \frac{N_K}{2} \sqrt{-k_{\tau 0}^2/3 + 4/3} ; \\ -Q_K &= \frac{\gamma_y}{2} + \frac{1}{6} | N_K k_{\tau 0} - \gamma_y | + \frac{N_K}{2} \sqrt{-k_{\tau 0}^2/3 + 4/3} . \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $k_{\tau 0}$ — среднее, находящееся в интервале от -1 до $+1$, из трех значений $k_{\tau(m)}$, рассчитываемых согласно (10).

Аналогичные выражения получены и для случая произвольного изменения параметров НН N_M и (или) τ_M . Полученные зависимости позволяют определить: а) генерируемую (потребляемую) устройством РМ, соответствующую минимуму его установленной мощности; б) мощности емкостных и индуктивных элементов СКУ (то есть оптимальный состав устройства и его установленную мощность) без предварительного выбора схемы и параметров СКУ.

Предложенный подход позволил разработать алгоритм и функциональную схему автоматического управления СКУ с известной установленной мощностью его реактивных элементов ($Q_{\text{Луст}}$ и $(-Q_K)_{\text{уст}}$), обеспечивающие во всех нагрузочных режимах при любых требованиях по РМ максимально возможную степень симметрирования (то есть минимально возможный уровень несимметрии токов и напряжений). Алгоритм управления СКУ реализует выражения (8), однако со скорректированным, минимально возможным коэффициентом частичного симметрирования, величина которого будет находиться согласно условию:

$$k_{\text{min}} = \max \left\{ 0, \frac{N - N'_{\text{кmax}}}{N} \right\} , \quad (13)$$

при этом максимальная величина пульсирующей мощности, которая может быть скомпенсирована данным СКУ, для произвольного режима определится как

$$N'_{\text{кmax}} = \min \left\{ N'_{\text{кmax}1, 2, 3, 4} \right\} , \quad (14)$$

где

$$N'_{\text{кmax}1, 2} = \frac{(3 \pm 1) \gamma_y / 3 + 2 Q_{\text{Луст}}}{\sqrt{-k_{\tau 0}^2 / 3 + 4/3} \pm k_{\tau 0} / 3} ; \quad (15)$$

$$N'_{\text{кmax}3, 4} = \frac{(-3 \pm 1) \gamma_y / 3 + 2 (-Q_K)_{\text{уст}}}{\sqrt{-k_{\tau 0}^2 / 3 + 4/3} \pm k_{\tau 0} / 3} . \quad (16)$$

Проведенный анализ потерь мощности в промышленных СЭС с НН показал, что несимметрия нагрузок оказывает незначительное влияние на потери мощности, обусловленные реактивными нагрузками. Таким образом, оптимальное потокораспределение РМ в СЭС с НН может

отличаться от рассчитываемого для симметричного нагрузочного режима только за счет наличия дополнительных реактивных элементов СКУ. При отсутствии необходимости в последних целевые функции приведенных затрат, а значит, и оптимальные решения для симметричного и несимметричного режимов СЭС будут совпадать.

Рассмотрена экономическая задача компенсации РМ несимметричных нагрузок симметричными БК. Показана возможность ее аналитического решения, при этом определена оптимальная РМ симметричной БК, подключаемой в узел сети с НН. Полученные зависимости могут быть использованы при расчетах входной РМ для СЭС с НН при отсутствии жестких требований по симметрированию режима.

Предложены подход, методика и алгоритм оптимального выбора и управления режимом БК в разветвленной СЭС предприятия с НН. В условиях эксплуатации предложенный алгоритм может быть реализован при разработке схемы и блока автоматического (централизованного) управления имеющимися БК, обеспечивающего минимизацию потерь мощности и ущерба от несимметрии и напряжений.

Рассмотрена задача выбора СКУ по критерию минимума приведенных затрат. При этом минимизируемая ЦФ записывается в виде:

$$Z = s_y | \gamma_y | + (s_K + s_L) \Delta Q_y + \frac{c_o R}{U^2} (Q_K - \gamma_y)^2, \quad (17)$$

где РМ дополнительных элементов устройства определяется выражением:

$$\Delta Q_y = -\frac{|\gamma_y|}{2} + \frac{1}{6} | N_K k_{\text{то}} - \gamma_y | + \frac{N_K}{2} \sqrt{-k_{\text{то}}^2/3 + 4/3}. \quad (18)$$

При положительных значениях γ_y в ЦФ подставляется $s_y = s_K$ и $\Delta Q_y = Q_L$, а при отрицательных — $s_y = s_L$ и $\Delta Q_y = -Q_K$. При решении задачи определяются три величины:

$$\gamma_{y \text{ opt } 1, 2, 3} = Q_K - s_{1, 2, 3} \frac{U^2}{2c_o R}, \quad (19)$$

где значения удельных приведенных затрат соответственно равны

$$s_1 = s_K; \quad s_2 = s_K - \frac{s_K + s_L}{3}; \quad s_3 = s_K - \frac{2(s_K + s_L)}{3}. \quad (20)$$

Как видно из (20), оптимальное значение РМ, генерируемой СКУ, зависит непосредственно — от РМ нагрузки, стоимостных показателей и параметров сети, и косвенно (неявно) — от несимметрии нагрузки. При этом показатели уровня последней определяют интервалы для областей изменения каждого из трех значений $\gamma_{y \text{ opt } i}$. Соотношение $\gamma_{y \text{ opt } 1} \leq \gamma_{y \text{ opt } 2} \leq \gamma_{y \text{ opt } 3}$ показывает, что с увеличением несимметрии нагрузки оптимальное значение РМ СКУ возрастает, и в тем большей

степени, чем больше соотношение стоимостных показателей реактивных элементов s_L/s_K .

На основе анализа ЦФ предложен алгоритм выбора оптимальных значений РМ СКУ в зависимости от соотношения ограничений по РМ, границ интервалов областей определения ЦФ $N_K K_0$, $N_K K_{max}$ (при $\gamma_y \geq 0$), $N_K K_{min}$ (при $\gamma_y \leq 0$) и рассчитанных значений величин γ_{opt1} , γ_{opt2} , γ_{opt3} .

Предложенный метод может быть использован для определения оптимальных значений входной РМ (соответствующих минимуму приведенных затрат) для несимметричных городских или промышленных потребителей.

В четвертой главе рассмотрены вопросы анализа и построения емкостных дискретно регулируемых устройств КРМ для несимметричных электротехнологических нагрузок.

Выбор параметров, режимов работы и алгоритмов управления емкостных устройств производится таким образом, чтобы соблюдалось условие совместности требований симметрирования режима и компенсации РМ, соответствующее соотношению $\gamma_y \geq N_K/K_u$. Здесь K_u представляет собой коэффициент использования емкостных элементов для частичного симметрирования. Значения K_u находятся в интервале от 0,5 до 1 и зависят от аргумента пульсирующей мощности. При изменяющихся параметрах НН ($\tau = 0+2\pi$) для наиболее неблагоприятного случая принимается $K_u = 0,5$.

Рассмотрены схемы и режимы работы одно-, двух- и трехступенчатых регулируемых емкостных СКУ, получены расчетные выражения и сформулирована инженерная методика их выбора.

Предложены алгоритм и схема управления емкостными СКУ, позволяющая обеспечить требуемые условия симметрирования и компенсации РМ в СЭС с произвольными изменяющимися НН. На предложенное техническое решение получено авторское свидетельство 1330700 СССР, МКИ³ Н 02 j 3/26.

Предложен способ построения схемы и алгоритма управления емкостными дискретно регулируемыми СКУ при подключении групп электротехнологических НН одинакового характера. Показано, что задание схемы подключения групповых НН одинакового характера при известном режиме работы последних позволяет осуществлять компенсацию РМ и частичное симметрирование по уровню суммарной реактивной нагрузки узла СЭС с НН.

В приложении содержатся документы о внедрении и использовании в народном хозяйстве разработанных рекомендаций и устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе решена актуальная задача разработки теоретических и практических методов оптимальной компенсации реактивной мощности в промышленных системах электроснабжения с несимметричными нагрузками. Основные результаты и выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. Описаны энергетические процессы в промышленных трехпроводных сетях при наличии несимметричных нагрузок. При этом получены все возможные варианты математических соотношений для пульсирующей мощности трехфазной системы и ее составляющих.

2. Разработаны математические модели симметрокомпенсирующих устройств как для случая симметрии, так и для общего случая несимметрии питающих напряжений. На их основе сформулирован алгоритм и предложена принципиальная структурная схема автоматического управления СКУ, отличительными особенностями которой, по сравнению с существующими, являются универсальность (алгоритм управления базируется на определении составляющих пульсирующей мощности трехфазной системы) и возможность коррекции степени симметрирования режима сети. На предложенное техническое решение получено авторское свидетельство.

3. Предложен графоаналитический метод анализа и синтеза схем симметрокомпенсирующих устройств, который позволяет и графически, и аналитически описывать области функционирования схем СКУ, а также определять типы схем с требуемыми характеристиками.

4. Получены математические модели оптимальной КРМ в промышленной СЭС с несимметричными нагрузками, и предложены подходы, методы, методики и алгоритмы выбора мест установки и параметров симметрокомпенсирующих устройств на основе критериев: а) минимума приведенных затрат; б) минимума установленной мощности; в) минимума потерь мощности в сети.

5. Предложены метод оптимального выбора СКУ по критерию минимума установленной мощности, алгоритм и функциональная схема автоматического управления СКУ. Их использование позволяет во всех нагрузочных режимах осуществлять максимально возможную компенсацию тока обратной последовательности в сети при оптимальной КРМ. На предложенное техническое решение подана заявка на изобретение.

6. Показано, что в промышленных СЭС несимметрия режима практически не оказывает влияние на потери мощности, обусловленные реактивным характером нагрузок. При этом оптимальное потокораспре-

деление реактивной мощности в СЭС с несимметричными нагрузками, соответствующее минимуму приведенных затрат, будет отличаться от рассчитываемого для симметричного нагрузочного режима только за счет наличия в составе СКУ дополнительных реактивных элементов.

7. Определены условия реализации, рассмотрены схемы и режимы работы и сформулирована инженерная методика выбора дискретно регулируемых одно-, двух- и трехступенчатых емкостных устройств для частичного симметрирования изменяющихся групповых НН. Предложенные алгоритм и схема управления емкостными СКУ легли в основу технического решения, на которое получено авторское свидетельство.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Лысенко А.Т. Частичное симметрирование групповых изменяющихся нагрузок / Ред.журнала "Техн. электродинамика". - Киев, 1984. - 32 с.: 16 ил. - Библ.: 9 назв. - Депон. в Информэнерго 24.09.84, № 1606эн-Д84.
2. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Лысенко А.Т., Кашакашвили В.Г., Штейнберг Э.А. Симметрирование и компенсация реактивной мощности в промышленных системах электроснабжения с групповыми несимметричными нагрузками // Промышленная энергетика. - 1986. - № 7. - С.43-45.
3. Кузнецов В.Г., Лысенко А.Т. Математическая модель компенсации реактивной мощности в промышленных системах электроснабжения с несимметричными электротехнологическими нагрузками // Техн. электродинамика. - 1987. - № 4. - С.72-78.
4. А.с. 1330700 СССР, кл. Н02 j 3/26. Симметрирующее устройство для произвольной трехфазной несимметричной нагрузки / А.К.Шидловский, В.Г.Кузнецов, А.С. Григорьев, Г.А. Москаленко, А.Т.Лысенко // Опубл. 15.08.87, Бюл. № 30.
5. Кузнецов В.Г., Лысенко А.Т. Параметры симметрокомпенсирующих устройств для изменяющихся несимметричных электротехнологических нагрузок // Техн. электродинамика. - 1988. - № 2. - С.81-86.
6. А.с. 1497681 СССР, кл. Н02 j 3/26. Симметрокомпенсирующее устройство для произвольной изменяющейся несимметричной нагрузки / А.К.Шидловский, В.Г.Кузнецов, Григорьев А.С., А.Т.Лысенко, Э.А.Штейнберг // Опубл. 30.07.89, Бюл. № 28.
7. Лысенко А.Т. Экономическая задача компенсации реактивной мощности в промышленных системах электроснабжения с несимметричными нагрузками // Кибернетика электрических систем. Электро-снабжение промышленных предприятий: Тез. докл. XI Конференция В.Стефанюк

- юз. науч. сем., г.Абакан, сент. 1989 г. - Абакан, 1989. - С.87-89.
8. Лысенко А.Т., Григорьев А.С. Компенсация реактивной мощности и симметрирование групповых электротехнологических нагрузок в разветвленных промышленных сетях // Оптимизация систем питания и электрооборудования электротехнологических установок. - Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1989. - С.76-83.
 9. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Лысенко А.Т. Математические модели симметрокомпенсирующих устройств в промышленных трехфазных электрических сетях. - Киев, 1989. - 40 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 609).
 10. Григорьев А.С., Лысенко А.Т. Эксплуатационная задача компенсации реактивной мощности в промышленных системах электроснабжения // Преобразование и стабилизация параметров электроэнергии. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 10-18.
 11. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Лысенко А.Т. Анализ и построение дискретно регулируемых емкостных симметрокомпенсирующих устройств для групповых изменяющихся несимметричных нагрузок. - Киев, 1990. - 25 с. (Препр./АН УССР. Ин-т электродинамики; № 648).
 12. Кузнецов В.Г., Лысенко А.Т., Григорьев А.С. Экономическая задача компенсации реактивной мощности несимметричных электротехнологических нагрузок промышленных сетей. - Киев, 1990. - 30 с. - (Препр./ АН УССР. Ин-т электродинамики; № 649).
 13. Лысенко А.Т. Графоаналитический метод определения областей функционирования и параметров схем симметрокомпенсирующих устройств // Изв.вузов. Электромеханика. - 1991. - № 4. - С.82-88.
 14. Григорьев А.С., Лысенко А.Т. Емкостные симметрокомпенсирующие устройства для изменяющихся несимметричных электротехнологических нагрузок // Качество электрической энергии: Науч. тр. междунар. науч. конф., Польша, г. Спала, 25-27 сент. 1991 г. - Спала, 1991. - Т.2. - С 53-59.
 15. Лысенко А.Т., Григорьев А.С. Анализ и управление несимметричным режимом трехфазной сети на основе составляющих пульсирующей мощности // Стабилизация параметров электрической энергии. - Киев: Ин-т электродинамики АН УССР. - 1991. - С.91-97.
 16. Григорьев А.С., Лысенко А.Т. Устройство для поддержания допустимой несимметрии напряжений и требуемой компенсации реактивной мощности // Стабилизация параметров электрической энергии. - Киев: Ин-т электродинамики АН УССР. - 1991. - С.98-104.
 17. Лысенко А.Т. Анализ и минимизация установленной мощности симметрокомпенсирующих устройств // Техн. электродинамика. - 1992. - № 1. - С.44-51.

18. Лысенко А.Т., Григорьев А.С. Оптимизация выбора и управления режимом симметрокомпенсирующих устройств // Электромагнитная совместимость технических средств: Тез докл. Второй науч.-техн. конф., г. Санкт-Петербург, 8-10 сент. 1992 г. - Санкт-Петербург: Судостроение, 1992. - С.45-46.
19. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Лысенко А.Т. Симметрокомпенсирующие устройства для изменяющихся несимметричных электротехнологических нагрузок // Промышленная энергетика. - 1992. - № 7. - С.37-41.

Личный вклад автора. Основные результаты, полученные автором в диссертации, опубликованы в трех работах, написанных автором самостоятельно и в шестнадцати трудах, изданных в соавторстве. В работах, написанных в соавторстве, личный вклад соискателя заключается в разработке математической модели оптимальной КРМ в СЭС с несимметричными нагрузками [3, 12]; развитии положений теории пульсирующих мощностей и вопросов анализа и синтеза схем СКУ [5, 9, 15, 16, 18]; формулировке условий реализации и разработке принципов построения емкостных устройств, используемых для симметрирования режима сети [1, 2, 8, 10, 11, 14, 19]. Все другие результаты, которые отражены в работах, написанных в соавторстве, получены при участии соискателя. В [4, 6] идеи изобретений принадлежат соавторам в равной мере.

Автор считает своим долгом выразить благодарность научному руководителю и сотрудникам отдела оптимизации систем электро-снабжения Института электродинамики АН Украины, а также кандидату технических наук А.С.Григорьеву за консультации и практическую помощь, оказанные при выполнении данной работы.

Соискатель



Подписано к печати 03.05.1993г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист.1,0. Уч.-изд.лист 1,0.
Тираж 110. Заказ 527, Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

№ 27.570
AB 27.570