

Анализ и оптимизация режимов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения

В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп, Ю. В. Ковалева, В. Ф. Харченко, Т. П. Бесараб, А. А. Краснов, И. В. Доманский, В. В. Доманский, Г. Н. Костин, Х. Дж. Абуджох

Представлено дослідження режимів в однофазній узагальненій системі електропостачання в аспекті підвищення енергетичних показників в системі шляхом компенсації реактивної потужності. Розглянуті три тестових варіанта системи електропостачання з різними співвідношеннями комплексних опорів навантаження та лінії електропередачі. Показані недоліки традиційного методу розрахунку параметрів компенсуючого пристрою, які забезпечують часткову компенсацію реактивної потужності, що споживається лише навантаженням. Аналіз режиму часткової компенсації свідчить про те, що зі збільшенням реактивності лінії електропередачі погіршуються енергетичні показники, які вдається отримати в результаті компенсації реактивної потужності. З застосуванням пошукової оптимізації показано, що для повної компенсації потрібне збільшення ємності компенсатора. Метод пошукової оптимізації реалізований в пакеті програм комп'ютерної математики MathCAD за допомогою вирішального блоку *given-find*. Для цього використовуються рівняння математичної моделі системи електропостачання на основі компонентних і топологічних рівнянь. В якості додаткових умов використані співвідношення, що визначають повну компенсацію реактивної потужності живильного джерела, а також умови фізичної можливості бути реалізованим структури компенсуючого пристрою. Перемінними оптимізації є параметри досліджуваного режиму і параметри компенсуючого пристрою. Представлені фрагменти текстів програм з числовими результатами розв'язань, а також порівняльні таблиці результатів аналізу і оптимізації режимів компенсації реактивної потужності в досліджуваних системах електропостачання для всіх варіантів їх параметрів. Дані кількісні оцінки величини додаткової ємності, яка обчислюється виходячи з умови компенсації нею реактивної потужності в лінії електропередачі. Дослідження, що проведені в роботі, показали, що при збільшенні реактивного опору лінії електропередачі повна компенсація не може бути досягнута із застосуванням поперечної компенсації і цьому явищу дана фізична трактовка. Вона полягає в тому, що напруга на компенсуючому поперечному конденсаторі зменшується швидше, ніж зростає компенсована ним реактивна потужність лінії електропередач. Показано, що в останньому випадку повна компенсація реактивної потужності все ж може бути досягнута застосуванням комбінованої поздовжньо-поперечної компенсації

Ключові слова: система електропостачання, реактивна потужність, режим компенсації, лінія електропередачі, компенсуючий пристрій

1. Введение

Повышение энергетических показателей в системах электроснабжения представляет важное направление в теории и практике электроэнергетики. В частности, улучшение условий передачи электроэнергии в тракте «источник – линия электропередачи – нагрузка» сопровождаются уменьшением токов через линию электропередачи. Это в свою очередь способствует снижению потерь на передачу электроэнергии, а, следовательно, повышается коэффициент полезного действия, определяющий энергоэффективность системы электроснабжения в целом. Одним из основных резервов повышения энергетических показателей систем электроснабжения является компенсация реактивной мощности в системе. Актуальность задачи точного определения условий полной компенсации реактивной мощности обусловлена возможностью максимальной разгрузки электроэнергетических сетей за счёт установки статических компенсаторов и точной настройки их параметров. Значение правильного решения этой проблемы усиливается по мере развития процессов интеллектуализации электрических сетей путём введения современного микропроцессорного оборудования в системы управления процессами электроснабжения и электропотребления.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопросы компенсации реактивной мощности освещены в ряде работ [1–6]. В [1] рассмотрены общие соображения по обеспечению компенсации реактивной мощности загрузки, однако доведение коэффициента мощности до максимального единичного значения не обеспечивается. Реактивная мощность высших гармоник исследуется в [2], при этом борьба за повышение энергетических показателей осуществляется лишь путём подавления высших гармоник, то есть, воздействие осуществляется лишь на коэффициент искажения токов, а коэффициент сдвига при этом не рассматривается. В [3] вопросы компенсации реактивной мощности рассматриваются в основном с точки зрения её регулирования электронными устройствами, что характерно значительным усложнением компенсирующих устройств, требующих использования дорогостоящих силовых полупроводниковых приборов и довольно сложных интеллектуальных систем управления. К тому же, сигналы для формирования корректирующих токов в известных системах снимаются с зажимов нагрузки, что не обеспечивает полного подавления реактивной мощности в системе. Действительно, напряжения в узлах присоединения загрузки отличаются от напряжений источников энергии, поскольку часть напряжения падает на сопротивлениях линий электропередачи. Эти сопротивления в общем случае могут достигать значительных величин, если учесть длину линии электропередачи и значительное количество преобразований напряжений трансформаторами на пути передачи электроэнергии от источника энергии до потребителя. Вопросы размещения компенсирующих устройств на промышленных предприятиях изложены в [4], при этом задача полного подавления реактивной мощности не ставится и не решается. В [5] приведён пример расчёта компенсирующих устройств при питании активно-индуктивной нагрузки от синхронного генератора с заданными параметрами. Здесь, однако, из-за отсутствия системного подхода решение задачи также ограничивается неполной ком-

пенсацией реактивной мощности в системе. Таким образом, задача полной компенсации реактивной мощности здесь также не решена. Кроме того, при принятых в этой работе параметрах синхронного генератора полная компенсация реактивной мощности, принципиально невозможна при использовании устройства поперечной компенсации реактивной мощности. Вопросы управления напряжением в системах передачи электроэнергии путем регулирования потоков реактивной мощности освещены в [6], однако случай комбинированной компенсации реактивной мощности, способной осуществить полную компенсацию реактивной мощности, не рассмотрен. В периодических изданиях последних лет также не снижается актуальность оптимизации процессов компенсации реактивной мощности. Так, в [7] обосновывается необходимость осуществления непрерывного мониторинга реактивной мощности и повышения точности процессов её компенсации. На важность компенсации реактивной мощности в условиях локальной изолированной системы электроснабжения указывается в [8]. А в [9] приводятся элементы оптимизации процессов компенсации реактивной мощности в системе с гидрогенератором небольшой мощности, что также свидетельствует об актуальности рассматриваемых в настоящей статье вопросов. Следует отметить в расчётном плане, что в большинстве случаев обобщения, нагрузка в системах электроснабжения в расчётном плане промышленных и коммунальных предприятий носит активно-индуктивный характер. Поэтому практическое применение получил способ компенсации реактивной мощности путем подключения параллельно нагрузке батарей конденсаторов [1–3]. Для обобщенных расчетов при использовании групповой компенсации реактивной мощности обычно применяется расчет объема реактивной мощности, компенсацию которой должны обеспечить конденсаторы для достижения коэффициента мощности от начального значения $\cos\varphi_1$ до конечного значения $\cos\varphi_2$. Этому соответствует известное выражение [4]

$$\Delta Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (1)$$

где ΔQ_C – реактивная мощность, компенсируемая батареями конденсаторов; P – активная мощность, потребляемая нагрузкой, в которой осуществляется компенсация; φ_1 , φ_2 – начальный и конечный углы, отражающие сдвиг токов относительно питающего напряжения при отсутствии компенсации и при ее наличии.

Далее по полученной разнице реактивных мощностей и номинальному напряжению на нагрузке может быть определена потребляемая емкость батареи конденсаторов. При соединении компенсирующих конденсаторов в треугольник емкость каждой батареи, подключаемой на линейное напряжение U_n , определяется следующей формулой:

$$C = \frac{\Delta Q_C}{3\omega U_n^2}, \quad (2)$$

где ω – круговая частота питающего напряжения.

Другой подход, использованный при решении конкретной задачи компенсации реактивной мощности в системе, питаемой от синхронного генератора [5], состоит в нахождении величины емкости, способной компенсировать реактивную составляющую активно-индуктивной проводимости нагрузки. Этот подход фактически эквивалентен принятому в электроэнергетике и использует выражения (1) и (2). Между тем, при обоих подходах к определению параметров компенсатора реактивной мощности учитываются лишь параметры нагрузки, а реактивности линий электропередачи остаются некомпенсированными. Таким образом, при традиционных подходах не решается задача полной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения. Это означает, что при этом обеспечивается лишь частичная компенсация реактивной мощности в системе, а, следовательно, остается резерв для достижения более эффективного режима компенсации реактивной мощности в системе. Следует также заметить, что описанные подходы предполагают полную симметрию трехфазной системы, а, следовательно, непригодны для точного определения емкостей конденсаторов, обеспечивающих симметрирование токов и напряжений в системе. Последнее важно с точки зрения необходимости равномерной загрузки фаз питающей системы, а также обеспечения симметричных режимов для питающих трансформаторов [6, 10]. В плане развития интеллектуальных электроэнергетических систем, снабженных информационными системами мониторинга всех участков системы электроснабжения и оперативного управления в автоматическом режиме, вопросы обеспечения полной компенсации реактивной мощности приобретают чрезвычайную актуальность. При такой оптимизации режимов возможно достижение значительного повышения энергоэффективности электрической системы в целом. И в этом плане развитие подходов и методов анализа и оптимизации режимов системы электроснабжения с целью определения параметров компенсаторов реактивной мощности, обеспечивающих полную компенсацию реактивной мощности, должно представлять актуальную и перспективную задачу.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является анализ и оптимизация режимов компенсации реактивной мощности с учетом возможных соотношений реактивных сопротивлений нагрузки и линии электропередачи и доведение режимов до полной компенсации реактивной мощности в системе. Достижение этой цели даст возможность использовать резерв снижения реактивной мощности и повысить энергетические показатели системы электроснабжения в целом.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

– разработать математические модели системы электроснабжения с использованием поисковой оптимизации для определения режимных параметров системы и параметров компенсирующих устройств;

– провести с помощью математических моделей анализ и оптимизацию режимов компенсации реактивной мощности при различных соотношениях между комплексными сопротивлениями нагрузки и линии электропередачи и сопоставить получаемые результаты;

– выявить условия, при которых поперечная компенсация неспособна обеспечить полную компенсацию реактивной мощности, дать этому явлению физическое обоснование и решить задачу полной компенсации с использованием комбинированного компенсатора реактивной мощности.

4. Разработка математической модели для анализа и оптимизации режимов системы электроснабжения

Будем рассматривать обобщенную систему электроснабжения в однофазном варианте (рис. 1), что допустимо в случае симметрии трехфазной системы электроснабжения по отношению к одной из фаз.

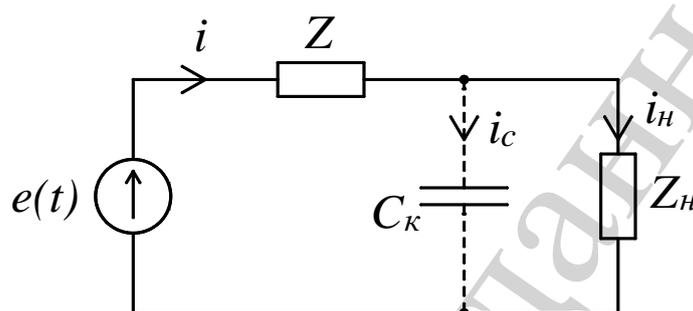


Рис. 1. Обобщённая система электроснабжения с компенсатором реактивной мощности

В рассматриваемой системе $e(t)$ – источник питающего синусоидального напряжения; z_n – комплексное сопротивление нагрузки, имеющей активно-индуктивный характер: $z_n = R_n + jx_n$; z – комплексное сопротивление, включающее в себя линии электропередачи и внутреннее сопротивление реального генератора электрической энергии: $z = r + jx$. В качестве компенсатора реактивной мощности использован конденсатор C_k , имитирующий нагрузочное сопротивление. Таким образом, рекомендуемыми точками подключения компенсирующего устройства являются зажимы присоединения нагрузки, что означает реализацию поперечной компенсации реактивной мощности.

Под режимом полной компенсации подразумевается такой режим, при котором источники питающих синусоидальных напряжений отдают в систему электроснабжения синусоидальные токи, совпадающие по фазе с генерируемыми синусоидальными напряжениями. Очевидно, что в режиме полной компенсации источники отдают лишь активную мощность, что соответствует максимально возможному единичному значению коэффициента мощности. В рассматриваемом случае линейной нагрузки коэффициент мощности [1–3] определяется лишь углом сдвига тока относительно напряжения. Точное определение параметров компенсатора, обеспечивающего полную компенсацию реактивной мощности, представляет собой нелинейную задачу. Её точное решение возможно лишь с использованием методов поисковой оптимизации [11–13]. Решение поставленной задачи далее осуществляется в системе компьютерной математики MathCAD для следующих нормированных параметрах обобщенной

схемы системы электроснабжения: $z_n = 0,7 + j\omega 0,005$; $z = 0,1 + j\omega 0,001$; $e(t) = 100$. Напряжение 100 В питающего источника удобно принять для расчётов, поскольку сразу же видна процентная составляющая любых напряжений в системе относительно задающего напряжения источника. К такой величине легко приводится любое напряжения реальной системы путём деления реального напряжения источника на соответствующее базовое напряжение. Текст программы для анализа режимов системы электроснабжения, обеспечивающей поисковую оптимизацию средствами MathCAD, приведен на рис. 2.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: $j := \sqrt{-1} = i$ $w := 100 \cdot \pi = 314,159$ $e := 100 = 100$

$z_n := 0.7 + j \cdot w \cdot 0.005 = 0.7 + 1.571i$ $z := 0.1 + j \cdot w \cdot 0.001 = 0.1 + 0.314i$

$z := z_n = \blacksquare$ (*равенство плеч*) $C_k := \frac{-\text{Im}(z_n^{-1})}{w} = 1.691 \times 10^{-3}$

НАЧ ЗНАЧ ПЕРЕМ ОПТИМИЗАЦИИ: $iz := 1 + j$ $un := 100 - j$ $in := 10 - j$ $C := 10^{-6}$

БЛОК ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ: Given

$iz = \frac{e - un}{z}$ $un = z_n \cdot in$ $in = iz - j \cdot w \cdot C \cdot un$ $\text{Im}(C) = 0$ $C = 10^{-12}$ БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ

$C = C_k$ ЧАСТИЧНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ $\text{Im}(e \cdot iz) = 0$ ПОЛНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ

$\begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C) = \begin{pmatrix} 19.079 - 44.954i \\ 19.079 - 44.954i \\ 83.969 - 1.498i \\ 1 \times 10^{-12} \end{pmatrix}$ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:

$ic := j \cdot w \cdot C \cdot un = 4.708 \times 10^{-10} + 2.638i \times 10^{-8}$

$C_k = 1.691 \times 10^{-3}$ $C = 1 \times 10^{-12}$

$|un| = 83.983$ $|iz| = 48.835$ $|in| = 48.835$

$S_n := 0.5 \cdot un \cdot \bar{in} = 834.713 + 1873.092i$ $S_z := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \bar{iz} = 119.245 + 374.618i$ $S_c := 0.5 \cdot un \cdot \bar{ic} = -0i$

$S_n + S_z + S_c = 953.958 + 2247.71i$ $S_e := \frac{e}{2} \cdot \bar{iz} = 953.958 + 2247.71i$

Рис. 2. Программа на MathCAD, обеспечивающая поисковую оптимизацию для исходного режима без компенсации

В разделе «Исходные данные» задаются круговая частота и амплитуда напряжения источника питающего напряжения. После задания комплексного сопротивления z_n нагрузки рассчитана величина ёмкости конденсатора, компенсирующего реактивность нагрузки, что осуществляется по формуле

$$C_k = \frac{\text{Im}(z_n^{-1})}{\omega} \quad (3)$$

из расчета, что проводимость конденсатора должна скомпенсировать реактивную составляющую проводимости нагрузки. Далее задается суммарное комплексное сопротивление z , включающее в себя внутреннее сопротивление линии электропередачи. Заблокированный оператор под комментарием

(*равенство плечей*) позволяет увеличить сопротивление z до значения z_n , что будет использовано для дальнейшего исследования.

В разделе «Начальные значения параметров оптимизации» задаются начальные значения тока i_z в линии электропередачи, напряжения u_n на нагрузке, тока i_n в нагрузке и емкость компенсирующего конденсатора C . Перечисленные переменные составляют вектор переменных оптимизации, чьи значения определяются в результате последующей поисковой оптимизации исходя из условий оптимизации. Блок поисковой оптимизации реализуется парой операторов `given-find`, обеспечивающих поисковую оптимизацию при условиях, которые задаются внутри этого блока. Условия записываются в виде уравнений, записываемых при помощи специального символа « $=$ » логического равенства. Первые три условия в блоке задают уравнения математической модели системы электроснабжения на основе уравнений по законам Ома и Кирхгофа. Последующее уравнение обеспечивает найденную величину емкости компенсирующего конденсатора в виде действительного числа. Из последующих трех условий, снабженных комментариями «Без компенсации», «Частичная компенсация», «Полная компенсация» должно быть разблокировано лишь одно условие, соответствующее выбранному варианту исследуемого режима.

5. Анализ и оптимизация режима при незначительной величине комплексного сопротивления линии электропередачи

На рис. 2 разблокирован оператор $C=10^{-12}$, что априори обеспечивает весьма малое значение емкости C конденсатора, т. е. фактически конденсатор исключается из системы электроснабжения. При этом исследуется исходный режим при отсутствии компенсирующего устройства. При разблокировании строки «Частичная компенсация» обеспечивается величина емкости, равная емкости C_k , компенсирующей лишь реактивность нагрузки и рассчитанная выше в разделе «Исходные данные». Если разблокировано условие под комментарием «полная компенсация», то включается условие

$$\text{Im}(e \cdot i) = 0. \tag{4}$$

При этом условии обеспечивается процесс оптимизации, в котором целевой функцией полагается значение, пропорциональное реактивной мощности источника, а переменными оптимизации принимаются токи в системе и величина емкости компенсирующего устройства. При этом для выполнения физической реализуемости на величину емкости налагается ограничение этой величины лишь действительным значением. Условие (4) обеспечивает равенство нулю реактивной мощности, отдаваемой источником, и соответствует случаю полной компенсации. Определение оптимальных значений переменных оптимизации обеспечивается оператором `Find` (i_z, i_n, u_n, C), где порядок перечисления переменных оптимизации соответствует порядку выдачи оптимальных значений переменных в векторе решения. Найденные оптимальные значения сразу же присваиваются самим переменным, перечисленным в векторе, стоящем в левой части оператора `Find`.

В разделе «Анализ полученного режима» находится ток i_c через компенсирующий конденсатор. Для сравнения приводятся значения емкостей C и C_k , которые будут отличаться в случае полной компенсации. Далее приводятся амплитудное значение напряжения u_n на нагрузке, тока i_z через линию электропередачи и тока i_n через нагрузку.

Далее вычислены полные мощности: S_n – потребляемая нагрузкой, S_z – потребляемая линией электропередачи, S_c – потребляемая компенсирующим конденсатором, S_e – отдаваемая источником электроэнергии. Суммирование пассивных элементов $S_n+S_z+S_c$ и сравнение этой суммы с мощностью S_e активного элемента позволяют произвести проверку баланса мощностей [1–3]. Анализ исходного некомпенсированного режима, представленный на рис. 2 в последнем разделе рабочего листа, показывает, что 16 % напряжения падает на линии электропередачи, что означает работу нагрузки при сниженном напряжении U_n , а, следовательно, недобор по мощности нагрузки $S_n=834+j1873$. В то же время через линию электропередачи протекает ток нагрузки амплитудой 48,8 А, что обуславливает существенный уровень активных потерь мощности в линии электропередачи ($\text{Re}(S_z)=119,245$ Вт). Следует отметить также, что источник загружен значительной реактивной мощностью ($\text{Im}(S_e)=2247$ ВАр).

На рис. 3 приведен фрагмент программы, соответствующий варианту частичной компенсации.

$$\begin{array}{l}
 \begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C) = \begin{pmatrix} 23.001 - 1.671i \\ 19.252 - 53.284i \\ 97.175 - 7.059i \\ 1.691 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \text{АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:} \\
 ic := j \cdot w \cdot C \cdot un = 3.749 + 51.614i \\
 C_k = 1.691 \times 10^{-3} \quad C = 1.6907 \times 10^{-3} \\
 |un| = 97.431 \quad |iz| = 23.061 \quad |in| = 56.656 \\
 S_n := 0.5 \cdot un \cdot \overline{in} = 1123.447 + 2521.01i \quad S_z := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \overline{iz} = 26.591 + 83.539i \quad S_c := 0.5 \cdot un \cdot \overline{ic} = -2521.01i \\
 S_n + S_z + S_c = 1150.039 + 83.539i \quad S_e := \frac{e}{2} \cdot \overline{iz} = 1150.039 + 83.539i
 \end{array}$$

Рис. 3. Фрагмент программы, соответствующий частичной компенсации

Из решения видно, что обеспечено $C=C_k$. Напряжение на нагрузке увеличилось до 97,4 % от питающего, благодаря чему увеличилась и мощность, потребляемая нагрузкой ($S_n=1123+j2521$). Это произошло благодаря уменьшению тока через линию электропередачи ($i_z=23,00$), и потери при этом снизились ($\text{Re}(S_z)=26,59$). В то же время реактивная мощность в системе скомпенсирована не полностью, поскольку источник электроэнергии отдает реактивную мощность $\text{Im}(S_e)=83,5$ ВАр.

На рис. 4 приведен фрагмент программы, обеспечивающей анализ режима полной компенсации реактивной мощности.

$$\begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C) = \begin{pmatrix} 23.248 \\ 19.24 - 53.608i \\ 97.675 - 7.304i \\ 1.747 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:

$$ic := j \cdot w \cdot C \cdot un = 4.009 + 53.608i$$

$$Ck = 1.691 \times 10^{-3} \quad C = 1.747 \times 10^{-3}$$

$$|un| = 97.948 \quad |iz| = 23.248 \quad |in| = 56.956$$

$$Sn := 0.5 \cdot un \cdot \overline{in} = 1135.397 + 2547.824i \quad Sz := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \overline{iz} = 27.024 + 84.9i \quad Sc := 0.5 \cdot un \cdot \overline{ic} = -2632.724i$$

$$Sn + Sz + Sc = 1162.421 \quad Se := \frac{e}{2} \cdot \overline{iz} = 1162.421$$

Рис. 4. Фрагмент программы, соответствующий полной компенсации

Здесь разблокирован оператор $I_m = (e \cdot i_z) = 0$, благодаря чему оптимизация обеспечивает нахождение решения при условии равенства нулю мнимой части полной мощности, отдаваемой источником. При этом напряжение на нагрузке достигло ее большей величины ($|U_n|=97,431$ В). Емкость компенсирующего конденсатора возросла до значения $C=1747$ мкФ, что несколько превышает значение емкости $C_k=1691$ мкФ, необходимое для компенсации реактивности нагрузки. Из-за увеличения напряжения на нагрузке, а, следовательно, и на самом компенсирующем конденсаторе, а также из-за увеличения проводимости конденсатора, возрастают токи, потребляемые конденсатором и нагрузкой, что приводит к возрастанию тока в линии электропередачи до значения $|i_z|=23,248$. Источник питания, как и задавалось при оптимизации, отдает активную мощность 1162,421 Вт при нулевой реактивной мощности. Сводная табл. 1 позволяет сопоставить режимные параметры исследуемой системы для всех трех режимов.

Таблица 1
Сопоставление режимных параметров

Параметр	Без компенсации	Частичная компенсация	Полная компенсация
Емкость компенсирующего конденсатора	10^{-12}	$1,691 \cdot 10^{-3}$	$1,747 \cdot 10^{-3}$
Амплитуда тока в нагрузке, i_n	48,835	56,656	56,956
Амплитуда тока в линии электропередачи, i_z	48,835	23,061	23,248
Амплитуда напряжения на нагрузке, u_n	83,983	97,431	97,948
Полная мощность потребляемая нагрузкой, S_n	$835+j1873$	$1123+j2521$	$1135+j2547$
Полная мощность, потребляемая линией электропередачи, S_z	$19,25+j374,6$	$26,59+j83,4$	$27,02+j84,9$
Полная мощность, потребляемая конденсатором, S_C	$-j0$	$-j2521$	$-j2632$
Полная мощность, отдаваемая источником, S_e	$953,9+j2247,2$	$1150+j83,54$	$1162,4+j0$

Сопоставляя результаты компьютерных экспериментов, можно заключить, что минимум потерь в линии электропередачи обеспечивается режимом частичной компенсации, однако при этом наблюдается пониженное напряжение на нагрузке в сравнении с режимом полной компенсации. В обоих случаях компенсации реактивной мощности ток в линии электропередачи снижается вдвое по сравнению с режимом при отсутствии компенсации. Увеличение емкости компенсирующего конденсатора в режиме полной компенсации физически можно объяснить тем, что добавочная реактивная мощность идет на компенсацию реактивной мощности линии электропередачи. Малая величина приращения емкости компенсирующего конденсатора может быть объяснена небольшой величиной индуктивности линии электропередачи. Рассмотрим, каким образом повлияет на параметры режимов и самой системы увеличение комплексного сопротивления линии электропередачи.

В случае равенства плеч электропередачи и нагрузки: $z = z_n = 0,7 + j\omega 0,005$. С этой целью разблокируем соответствующий оператор в разделе «Исходные данные». Режим без компенсации этой тестовой схемы приведен на рис. 5, откуда видно, что напряжение на нагрузке составляет ровно половину питающего напряжения.

$$\begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C) = \begin{pmatrix} 11.835 - 26.557i \\ 11.835 - 26.557i \\ 50 - 5.498i \times 10^{-9} \\ 1 \times 10^{-12} \end{pmatrix}$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:

$$ic := j \cdot \omega \cdot C \cdot un = 1.571i \times 10^{-8}$$

$$Ck = 1.691 \times 10^{-3} \quad C = 1 \times 10^{-12}$$

$$|un| = 50.000 \quad |iz| = 29.075 \quad |in| = 29.075$$

$$Sn := 0.5 \cdot un \cdot \bar{in} = 295.868 + 663.926i \quad Sz := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \bar{iz} = 295.868 + 663.926i \quad Sc := 0.5 \cdot un \cdot \bar{ic} = -0i$$

$$Sn + Sz + Sc = 591.736 + 1327.852i \quad Se := \frac{e}{2} \cdot \bar{iz} = 591.736 + 1327.852i$$

Рис. 5. Программа расчёта режима без компенсации при равенстве плеч

Подключение емкости C_k , обеспечивающей частичную компенсацию (программа на рис. 6) позволяет увеличить напряжение нагрузки до 81,8 В.

$$\begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C) = \begin{pmatrix} 18.43 - 5.878i \\ 5.239 - 47.236i \\ 77.865 - 24.835i \\ 1.691 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:

$$ic := j \cdot w \cdot C \cdot un = 13.191 + 41.357i$$

$$Ck = 1.691 \times 10^{-3} \quad C = 1.6907 \times 10^{-3}$$

$$|un| = 81.730 \quad |iz| = 19.345 \quad |in| = 47.525$$

$$Sn := 0.5 \cdot un \cdot \overline{in} = 790.531 + 1773.949i \quad Sz := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \overline{iz} = 130.98 + 293.918i \quad Sc := 0.5 \cdot un \cdot \overline{ic} = -1773.949i$$

$$Sn + Sz + Sc = 921.512 + 293.918i \quad Se := \frac{e}{2} \cdot \overline{iz} = 921.512 + 293.918i$$

Рис. 6. Расчет режима при частичной компенсации при равенстве плеч

В режиме полной компенсации (программа на рис. 7) напряжение на нагрузке позволяет еще на 10 % увеличить напряжение на нагрузке и довести его до 91,3 В.

$$\begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C) = \begin{pmatrix} 23.669 \\ -53.114i \\ 83.431 - 37.18i \\ 2.026 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:

$$ic := j \cdot w \cdot C \cdot un = 23.669 + 53.114i$$

$$Ck = 1.691 \times 10^{-3} \quad C = 2.0264 \times 10^{-3}$$

$$|un| = 91.341 \quad |iz| = 23.669 \quad |in| = 53.114$$

$$Sn := 0.5 \cdot un \cdot \overline{in} = 987.387 + 2215.691i \quad Sz := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \overline{iz} = 196.085 + 440.013i \quad Sc := 0.5 \cdot un \cdot \overline{ic} = -2655.704i$$

$$Sn + Sz + Sc = 1183.472 \quad Se := \frac{e}{2} \cdot \overline{iz} = 1183.472$$

Рис. 7. Расчет режима полной компенсации при равенстве плеч

Сводные данные по трем режимам второй тестовой схемы включены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что режим полной компенсации обеспечивает максимальную мощность на нагрузке благодаря значительному увеличению амплитуды напряжения на нагрузке.

Величина ёмкости C , обеспечивающей полную компенсацию реактивной мощности, для второй тестовой системы еще более отличается от величины C_k , обеспечивающей компенсацию реактивности нагрузки. Это увеличение можно трактовать как дополнительную емкость ΔC , которая обеспечивает дополнительную компенсацию реактивности линии нагрузки. Такое разделение приводит к эквивалентной схеме, приведенной на рис. 8.

Здесь емкость компенсирующего устройства C условно разделена на C_k , компенсирующего реактивность нагрузки, и на ΔC , компенсирующего реактивность линии электропередачи. Непосредственное точное вычисление добавочной емкости ΔC невозможно, поскольку необходимо знать точное значение

общего напряжения на нагрузке и на компенсирующем конденсаторе непосредственно в режиме полной компенсации реактивной мощности. Это возможно осуществить путем дополнительного фрагмента программы, приведенного на рис. 9, а для первого тестового варианта системы.

Таблица 2
Режимные параметры при равенстве плеч

Параметр	Без компенсации	Частичная компенсация	Полная компенсация
Емкость компенсирующего конденсатора	0	1691 мкФ	2026,4 мкФ
Амплитуда тока в нагрузке, i_n	29,075	47,525	53,114
Амплитуда тока в линии электропередачи, i_z	29,075	19,345	23,669
Амплитуда напряжения на нагрузке, u_n	50,0	81,73	91,341
Полная мощность потребляемая нагрузкой, S_n	$296+j664$	$791+j1774$	$987+j2216$
Полная мощность, потребляемая линией электропередачи, S_z	$296+j664$	$131+j294$	$196+j440$
Полная мощность, потребляемая конденсатором, S_c	0	$-j1774$	$-j2656$
Полная мощность, отдаваемая источником, S_e	$592+j1328$	$922+j294$	$1183+j0$

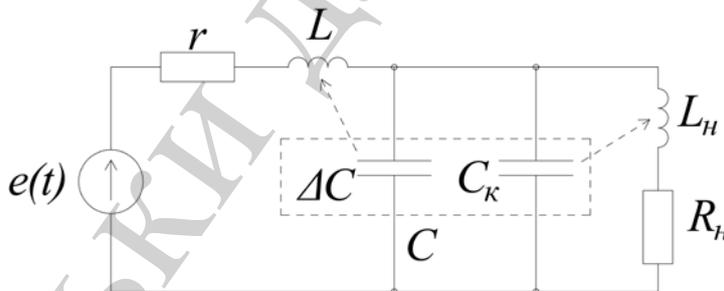


Рис. 8. Эквивалентная схема с выделенным конденсатором, учитывающим линию электропередачи

Контроль доли РМ в z:

$$iDC := 1 + j \quad DC := 10^{-6}$$

Given

$$iDC = j \cdot \omega \cdot DC \cdot un$$

$$\text{Im}(S_z) = -\text{Im}(0.5 \cdot un \cdot \overline{iDC})$$

$$\text{Im}(DC) = 0$$

$$\begin{pmatrix} DC \\ iDC \end{pmatrix} := \text{Find}(DC, iDC) = \begin{pmatrix} 5.63374 \times 10^{-5} \\ 0.12927 + 1.72875i \end{pmatrix}$$

$$C - C_k = 5.63374 \times 10^{-5}$$

a

Контроль доли РМ в z:

$$iDC := 1 + j \quad DC := 10^{-6}$$

Given

$$iDC = j \cdot \omega \cdot DC \cdot un$$

$$\text{Im}(S_z) = -\text{Im}(0.5 \cdot un \cdot \overline{iDC})$$

$$\text{Im}(DC) = 0$$

$$\begin{pmatrix} DC \\ iDC \end{pmatrix} := \text{Find}(DC, iDC) = \begin{pmatrix} 3.3575 \times 10^{-4} \\ 3.92169 + 8.80026i \end{pmatrix}$$

$$C - C_k = 3.3575 \times 10^{-4}$$

б

Рис. 9. Программы, вычисляющие величины дополнительных ёмкостей: *a* – для первого варианта тестовой схемы, *б* – для второго варианта тестовой схемы

Здесь блок поисковой оптимизации формирует решение для ранее рассчитанного режима полной компенсации (рис. 4). При найденных величинах напряжения на конденсаторах C_k и ΔC (рис. 8) рассчитывается значение $\Delta C = DC$, которое обеспечивает такое же потребление реактивной мощности конденсатором ΔC , какое потребляет индуктивное сопротивление $\text{Im}(z)$ линии электроснабжения. Для проверки в конце размещен оператор, показывающий разность $C - C_k$, которая оказывается в точности равной добавочной емкости ΔC .

На рис. 9, *б* размещен аналогичный фрагмент программы, вычисляющий добавочную емкость ΔC для второй тестовой системы, для которой расчет режима полной компенсации реактивной мощности представлен на рис. 7. В этом случае определенное из условия равенства реактивных мощностей индуктивности линии электропередачи и добавочного конденсатора ΔC , емкость последнего в точности равна разности между емкостями C и C_k , обеспечивающих соответственно полную и частичную компенсацию.

Воздействие компенсатора C , подключаемого параллельно нагрузке и осуществляющего таким образом так называемую поперечную компенсацию, не всегда способно приводить систему электроснабжения к режиму полной компенсации. В качестве подтверждения рассмотрим обобщенную систему электроснабжения при параметрах, указанных при решении задачи на компенсацию реактивной мощности в [5].

6. Анализ и оптимизация режима при значительной величине комплексного сопротивления линии электропередачи

Здесь параметры системы заимствованы из [5], где рассмотрена система, питаемая от синхронного генератора мощностью $S_G = 15$ МВА и напряжением $U_n = 6300$ В. Внутреннее сопротивление генератора принято $Z_G = 0,066 + j3,2$. При

сопротивлении линии электропередачи $Z_e=0,11+j0,063$. Сопротивление нагрузки полагается равным $Z_H=2,015+j1,511$. Тогда сопротивление плеча линии электропередачи получим, суммируя комплексные сопротивления генератора и линии электропередачи: $Z=Z_G+Z_e=0,176+j3,263$.

Обращает на себя внимание относительно большая величина индуктивного сопротивления генератора X_G по сравнению с индуктивным сопротивлением нагрузки X_H . Оценим базовое сопротивление синхронного генератора

$$z_0 = \frac{U_H^2}{S} = \frac{6,3^2}{15} = 2,646. \quad (5)$$

Относительное значение индуктивного сопротивления синхронного генератора

$$x^* = \frac{x_G}{z_0} = \frac{3,2}{2,646} = 1,209, \quad (6)$$

что значительно больше в сравнении с диапазоном $X^*=0,08 \div 0,3$ для синхронных турбо- и гидрогенераторов [10]. Даже оценка по верхнему пределу $X^*=0,3$ приводит к максимально допустимому сопротивлению генератора

$$X_G=0,3 \cdot 3,646=0,794 \text{ Ом}. \quad (7)$$

Таким образом, превышение параметра над предельным значением составляет величину $3,2/0,794=4$. Заметим, что в [5] выбор такой величины индуктивного сопротивления синхронного генератора ничем не обосновывается. Кроме того, в [5] априори полагается, что через линию энергия передается с 5 % потерями напряжения, что при принятых параметрах не соответствует действительности. На рис. 10 приведены результаты анализа исходного режима системы с параметрами, принятыми в [5].

$$\begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C) = \begin{pmatrix} 7.941 - 17.302i \\ 7.941 - 17.302i \\ 42.145 - 22.866i \\ 1 \times 10^{-12} \end{pmatrix}$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:

$$ic := j \cdot \omega \cdot C \cdot un = 7.183 \times 10^{-9} + 1.324i \times 10^{-8}$$

$$Ck = 7.582 \times 10^{-4} \quad C = 1 \times 10^{-12}$$

$$|un| = 47.948 \quad |iz| = 19.038 \quad |in| = 19.038$$

$$Sn := 0.5 \cdot un \cdot \overline{in} = 365.148 + 273.816i \quad Sz := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \overline{iz} = 31.894 + 591.304i \quad Sc := 0.5 \cdot un \cdot \overline{ic} = -0i$$

$$Sn + Sz + Sc = 397.042 + 865.12i \quad Se := \frac{e}{2} \cdot \overline{iz} = 397.042 + 865.12i$$

Рис. 10. Результаты анализа исходного режима системы для случая большой реактивности линии электропередач

Напряжение источника далее считается нормированным и составляет величину 100 В. Как видно из решения, напряжение на нагрузке составляет 47,9 В, что гораздо меньше ожидаемого 95 В в [5]. Из-за сниженного напряжения, обусловленного большим сопротивлением линии электропередачи, развиваемая на нагрузке мощность составляет лишь четверть от ожидаемой, что не представляет номинальный режим в системе электроснабжения.

Режим частичной компенсации реактивной мощности осуществляется подключением конденсатора $C_k=758,2$ мкФ, компенсирующего лишь реактивную мощность нагрузки. Соответствующий этому режиму рабочий лист с программой приведен на рис. 11.

$$\begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C) = \begin{pmatrix} 15.321 - 15.039i \\ 4.043 - 26.528i \\ 48.23 - 47.344i \\ 7.582 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:

$$ic := j \cdot \omega \cdot C \cdot un = 11.278 + 11.489i$$

$$C_k = 7.582 \times 10^{-4} \quad C = 7.5822 \times 10^{-4}$$

$$|un| = 67.585 \quad |iz| = 21.469 \quad |in| = 26.834$$

$$S_n := 0.5 \cdot un \cdot \bar{in} = 725.475 + 544.016i \quad S_z := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \bar{iz} = 40.559 + 751.962i \quad S_c := 0.5 \cdot un \cdot \bar{ic} = -544.016i$$

$$S_n + S_z + S_c = 766.034 + 751.962i \quad S_e := \frac{e}{2} \cdot \bar{iz} = 766.034 + 751.962i$$

Рис. 11. Программа, соответствующая режиму частичной компенсации

Частичная компенсация позволила повысить напряжение на нагрузке до 67,6 В, то есть до 2/3 от номинального, что обуславливает развитие на нагрузке мощности, составляющей лишь 45 % от ожидаемой. Именно на этом варианте частичной компенсации зафиксирован в [5] результат решения задачи компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения.

Включение в программе опции «Полная компенсация» с введением условия отсутствия реактивной мощности источника не привело к решению, а решение этой задачи путем поисковой оптимизации с использованием визуальной модели [11–13] минимизировало реактивную мощность источника при емкости конденсатора, близкой к C_k . (Между тем, замена X_G на предельное значение $X_G=0,794$ Ом дает решение для режима полной компенсации реактивной мощности, и при этом варианте на нагрузке достигает 98,3 В, демонстрируя эффективность полной компенсации.)

Причины невозможности полной компенсации при использовании поперечного конденсатора C , шунтирующего нагрузку, поясняются таблицей 3, отражающей исследование нарастания реактивных мощностей Q_z в линии электропередачи и $Q_{\Delta C}$ дополнительного конденсатора ΔC (рис. 8).

В табл. 3 представлено исследование нарастания реактивных мощностей в линии электропередачи и дополнительного конденсатора.

Таблица 3

Изменения реактивных мощностей линии электропередачи и компенсирующей поперечной емкости

$C_k + \Delta C$	$ i_z $	$ u_n $	Q_z	$Q_{\Delta C}$
758,2	21,469	67,585	751,962	0
858,2	22,601	70,803	833,346	-78,744
958,2	23,993	74,096	939,205	-172,48
1058,2	25,647	77,404	1073	-282,334
1158,2	27,547	80,639	1238	-408,573
1258,2	29,658	82,693	1435	-550,128
1358,2	31,926	86,433	1663	-704,09
1458,2	34,275	88,716	1917	-856,41
1558,2	36,618	90,402	2188	-1027
1958,2	44,152	89,563	3181	-1512

В первом столбце отражены значения суммарной емкости $C_k + \Delta C$. Второй и третий столбцы показывают изменения модулей тока через линию $|i_z|$ и напряжения на нагрузке $|u_n|$. Именно эти величины определяют уровни реактивной мощности в линии электропередачи и в добавочном конденсаторе ΔC . Реактивные мощности Q_z и $Q_{\Delta C}$ (соответственно в 4 и 5 столбцах) при увеличении ΔC возрастают. Следует заметить, что в точке режима полной компенсации реактивной мощности алгебраическая сумма этих мощностей должна стать нулевой. С увеличением ΔC увеличивается потребление тока этого конденсатора, что увеличивает ток через линию электропередачи и, соответственно, нарастает реактивная мощность Q_z . Однако при этом возрастает напряжения на конденсаторе и его емкость, что приводит также к возрастанию мощности $Q_{\Delta C}$. Вопрос достижения условия полной компенсации состоит в том, успеет ли величина $Q_{\Delta C}$ «догнать» величину Q_z прежде, чем напряжение на нагрузке начнет снижаться из-за чрезмерно возрастания тока в линии электропередачи. Как видно из табл. 3, в рассматриваемом случае при увеличении емкости $C_k + \Delta C$ реактивная мощность в линии электропередачи возрастает быстрее, чем компенсирующая реактивная мощность добавочной емкости ΔC , причем последняя по достижении значения $\Delta C = 2000$ мкФ (последняя строка табл. 3) начинает снижаться из-за уменьшения напряжения $|u_n|$. Такова физическая картина случая невозможности достижения режима полной компенсации при помощи поперечного компенсирующего конденсатора C . Рассмотренный случай чрезмерно большого реактивного сопротивления линии электропередачи может все же представлять практический интерес при системном подходе к вопросу полной компенсации реактивной мощности, способной существенно разгрузить первичные источники электрической энергии.

Полная компенсация реактивной мощности в рассматриваемом варианте параметров достигается введением комбинированной продольно-поперечной компенсации, осуществляемой по схеме, представленной на рис. 12.

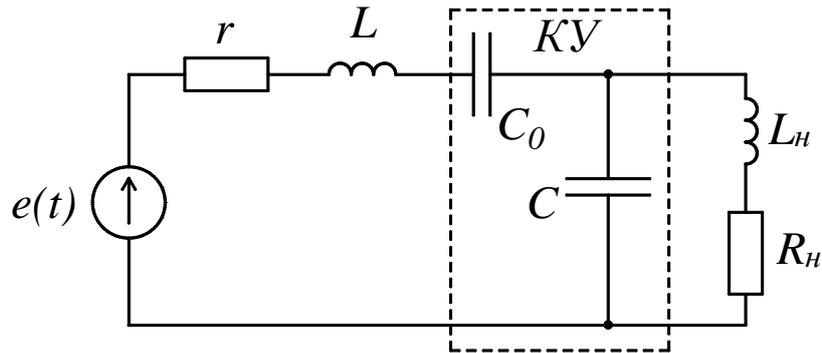


Рис. 12. Система с комбинированной продольно-поперечной компенсацией

Здесь вводится дополнительный конденсатор C_0 , обеспечивающий так называемую продольную компенсацию [1, 4, 6]. Таким образом, компенсирующее устройство КУ состоит из продольной емкости C_0 и поперечной емкости C (рис. 12). Вариации емкостей продольной и поперечной компенсации способны создать условия для полной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения в тех случаях, когда поперечная компенсация способна обеспечить лишь частичную компенсацию реактивной мощности. На рис. 13 представлена программа для расчета режима полной компенсации при использовании продольного и поперечного конденсаторов.

БЛОК ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ: Given

$$iz = \frac{e - un}{z + \frac{1}{j \cdot w \cdot C_0}} \quad un = zn \cdot in \quad in = iz - j \cdot w \cdot C \cdot un \quad \text{Im}(e \cdot \bar{iz}) = 0 \quad \text{ПОЛНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ}$$

$$\text{Im}(C) = 0 \quad \text{Im}(C_0) = 0 \quad \text{Re}(C) > 0 \quad \text{Re}(C_0) > 0$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА:

$$\begin{pmatrix} iz \\ in \\ un \\ C \\ C_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(iz, in, un, C, C_0) = \begin{pmatrix} 30.3243 \\ 27.9975 - 25.313i \\ 94.6629 - 8.7014i \\ 8.5116 \times 10^{-4} \\ 1.0696 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$ic := j \cdot w \cdot C \cdot un = 3.142 \times 10^{-10} + 3.142i \times 10^{-8}$$

$$Ck = 7.582 \times 10^{-4} \quad C_0 = 1.07 \times 10^{-3} \quad |iz| = 30.324$$

$$C = 8.5116 \times 10^{-4} \quad |un| = 95.062 \quad |in| = 37.744$$

$$Sn := 0.5 \cdot un \cdot \bar{in} = 1435.293 + 1076.292i \quad ic := j \cdot w \cdot C \cdot un = 2.327 + 25.313i$$

$$Sc := 0.5 \cdot un \cdot \bar{ic} = -1208.224i \quad Sn_{max} := 0.5 \cdot e \cdot \overline{\left(\frac{e}{zn}\right)} = 1588.278 + 1191.012i$$

$$Se := \frac{e}{2} \cdot \bar{iz} = 1516.214 \quad Sn + Sz + Sc = 1516.214 \quad Sz := 0.5 \cdot (e - un) \cdot \bar{iz} = 80.922 + 131.932i$$

Рис. 13. Программа для расчёта режима полной компенсации при использовании продольного и поперечного конденсаторов

Отличие этой программы от предыдущих состоит во введении в рассмотрение дополнительной переменной оптимизации C_0 , соответствующей емкости

продольного конденсатора с начальным значением $C_0=1$. В модели системы C_0 легко учитывается в первом уравнении блока поисковой оптимизации, где комплексное сопротивление продольной емкости учтено в знаменателе правой части в виде добавки к сопротивлению z линии электропередачи. Режим полной компенсации, как видно из решения, обеспечивается при емкостях конденсатора $C=851,27$ мкФ и $C_0=1069,7$ мкФ. Уровень напряжения на нагрузке достигает 95,063, что отвечает описанному в [5] режиму питания нагрузки в системе.

Сводная табл. 4 позволяет сравнить режимные параметры третьей тестовой системы для исходного режима, режима частичной поперечной компенсации и режима полной компенсации.

Таблица 4

Режимные параметры для исходного режима, режима частичной поперечной компенсации и режима полной компенсации

Параметр	Без компенсации	Частичная компенсация	Полная компенсация
Емкость поперечного конденсатора	0	758,2	851,27
Емкость продольного конденсатора	∞	∞	1069,7
Амплитуда тока в линии электропередачи	19,038	21,469	30,325
Амплитуда напряжения на нагрузке	47,95	67,585	95,063
Полная мощность потребляемая нагрузкой	$365+j274$	$725,5+j544$	$1435+j1076$
Полная мощность, потребляемая линией электропередачи и продольной емкостью	$31,9+j591$	$40,6+j752$	$80,9+j132$
Полная мощность, потребляемая поперечным конденсатором	0	$-j544,02$	$-j1208,4$
Полная мощность, отдаваемая источником	$397+j865$	$766+j752$	1516,2

Анализ данных, представляемых в табл. 4, наглядно показывает все преимущества режима полной компенсации реактивной мощности в сравнении с любым иным режимом.

7. Обсуждение результатов анализа и оптимизации режимов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения

Приведённые в статье материалы показывают, что разработанные математические модели с использованием поисковой оптимизации и реализованные в системе MathCAD позволили решить все поставленные задания по анализу и оптимизации режимов компенсации реактивной мощности. Прежде всего, по-

казано, что традиционный метод выбора параметров компенсатора, ориентированный на компенсацию реактивной мощности лишь нагрузки, сохраняет в системе остаточную реактивную мощность. Такой режим не является оптимальным с точки зрения источника электроэнергии, поскольку от него продолжает потребляться реактивная составляющая полной мощности. В рассмотренных вариантах с относительно малым реактивным сопротивлением линии электропередачи имеется возможность обеспечить полную компенсацию благодаря некоторому увеличению ёмкости поперечного компенсирующего устройства. Расчёты показали, что в режиме полной компенсации могут заметно повыситься напряжение и мощность на нагрузке по сравнению с режимом частичной компенсации. Проведённые с помощью оптимизационных методов расчёты позволили показать, что доля компенсированной реактивной мощности за счёт добавочного увеличения ёмкости поперечного компенсатора в точности соответствует реактивной составляющей мощности линии электропередачи. Исследование варианта параметров системы, когда реактивное сопротивление линии электропередачи относительно велико, показало, что возможности поперечной компенсации обеспечить полную компенсацию реактивной мощности ограничиваются. Расчёты на математической модели позволили дать физическую интерпретацию этому явлению, что связано с уменьшением напряжения на компенсирующем конденсаторе. Это, в свою очередь, уменьшает потребляемую им реактивную мощность компенсации. В этом случае предложено для достижения полной компенсации использовать комбинированную продольно-поперечную компенсацию с включением в схему компенсирующего устройства двух конденсаторов. Показано, что параметры такого компенсатора, обеспечивающего полную компенсацию реактивной мощности, также рассчитываются с помощью представленных в статье математических моделей на основе поисковой оптимизации.

Использование предложенных подходов гарантирует достижение высокой точности режима полной компенсации и минимизацию затрат компьютерного времени на проведение исследований. Изложенные в статье исследования являются дальнейшим развитием предложенного в работах авторов [11–13] метода поисковой оптимизации применительно к задачам улучшения энергетических показателей электрических систем. Предполагается дальнейшее развитие предложенных в статье подходов применительно к системам электроснабжения с нелинейными нагрузками и компенсаторами реактивной мощности на полупроводниковых элементах.

12. Выводы

1. Применение разработанных математических моделей систем электроснабжения позволило в полном объёме произвести анализ и оптимизацию режимов в системе электроснабжения при различных параметрах системы и компенсирующего устройства. Это обусловлено включением в программу модели, наряду с компонентными и топологическими уравнениями, условий нахождения решения путем оптимизации по заданным критериям полной компенсации.

2. Использование традиционного подхода к расчету параметров компенсатора реактивной мощности не обеспечивает полной компенсации реактивной мощности. Частичная компенсация реактивной мощности в зависимости от параметров линии электропередачи приводит к режиму с недобором мощности в нагрузке порядка 20–40 %. С помощью предложенных в статье методов формирования математических моделей на основе поисковой оптимизации представилось возможным точно рассчитать параметры компенсирующего устройства, которое обеспечивает полную компенсацию реактивной мощности в системе. Благодаря полной компенсации устанавливается режим, оптимальный по всем энергетическим показателям.

3. Условия, при которых поперечная компенсация неспособна обеспечить полную компенсацию, наступают при возрастании комплексного сопротивления линии электропередачи, когда увеличение ёмкости конденсатора вызывает уменьшение напряжения на нем, а, следовательно, снижение реактивной мощности, потребляемой конденсатором. В этом случае оптимальный режим может быть достигнут применением комбинированной продольно-поперечной компенсации реактивной мощности, что позволяет довести коэффициент мощности до максимального единичного значения.

Литература

1. Hofmann W., Schlabbach J., Just W. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. John Wiley & Sons, 2012. 274 p. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119967286>
2. Arrillaga J., Watson N. R., Chen S. Power system quality assessment. John Wiley, 2000. 300 p.
3. Acha E., Agelidis V. G., Miller T. J. E. Electronic Control in Electrical Systems. Newnes, 2002. 464 p. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-5126-4.x5000-7>
4. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. Львов: Инжиниринг, 2006. 622 с.
5. Міліх В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств. Харків, 2016. 272 с.
6. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии. Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. 720 с.
7. Nanda P., Kumar Panigrahi C., Dasgupta A. Reactive power monitoring and compensation in a distribution network of modern power system // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, Issue 22. P. 12395–12402.
8. Gayatri M. T. L., Parimi A. M., Pavan Kumar A. V. A review of reactive power compensation techniques in microgrids // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 1030–1036. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.006>
9. Optimization of reactive power compensation for distribution power system with small hydro power / Han Y., Chen L., Ma H., Wang Z. // 2014 International Conference on Power System Technology. 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/powercon.2014.6993939>
10. Копылов И. П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2004. 607 с.

11. Ягуп В. Г., Ягуп Е. В. Применение оптимизационных методов для решения задач улучшения показателей электрических систем. Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2017. 170 с.

12. Ягуп В. Г., Ягуп Е. В. Синтез электрической системы во временной области методом поисковой оптимизации // Технічна електродинаміка. 2015. № 2. С. 24–29.

13. Ягуп В. Г., Ягуп Е. В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации // Технічна електродинаміка. 2016. № 1. С. 60–66.

Не є перевиданням