



КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Компенсация реактивной мощности в электрических сетях

Джагаров Н. Ф., доктор техн. наук

Высшее военно-морское училище им. Николы Вапцарова, Варна (Болгария)

Показано, что проблема компенсации реактивной мощности остается актуальной в свете обеспечения надежности и безопасности передачи энергии и устойчивости работы электроэнергетических систем, особенно при наличии распределенной генерации. Представлен обзор современного состояния проблемы, классифицированы методы и средства компенсации, а также средства управления компенсирующими устройствами.

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсация, компенсирующие устройства, управление компенсацией.

В настоящее время проблемы, связанные с отклонением напряжения при изменении нагрузок и ограничением объемов передаваемой энергии из-за нехватки реактивной мощности, усугубились в связи с ужесточением требований к обеспечению надежности и безопасности передачи энергии и устойчивости работы объединенных электроэнергетических систем (ЭЭС). С появлением мощных и надежных электронных вентилях стало возможным создание разных статических преобразователей и контроллеров, позволяющих не только получить электроэнергию необходимого качества и уменьшить потери, но и управлять потоками энергии в электрических сетях, обеспечивая максимальную ее передачу. Особенно актуален вопрос компенсации реактивной мощности в связи с освоением возобновляемых источников, при использовании которых генерация электроэнергии стала распределенной.

В статье сделан обзор современного развития компенсации реактивной мощности в электрических сетях, при этом основное внимание уделено методам и средствам компенсации, а также вопросам управления компенсирующими устройствами и применения различных типов компенсации.

Методы вычисления реактивной мощности

Существуют различные методы вычисления мгновенных значений активной и реактивной мощности в ЭЭС во временной и частотной областях [1 – 6]. Классические формулы для их определения относятся к синусоидальным режимам. Ниже описаны

некоторые методы, используемые при управлении компенсацией в случае наличия гармоник токов и напряжений.

В многофазных системах при произвольной форме кривых напряжений и токов мгновенное значение активной мощности определяют как произведение векторов фазных токов и напряжений:

$$p(t) = u(t)^T i(t). \quad (1)$$

При синусоидальной форме кривых токов и напряжений мгновенную, среднюю активную и реактивную, а также полную мощность находят по следующим формулам:

$$p(t) = 3UI \cos \varphi; \quad (2)$$

$$P = 3UI \cos \varphi; \quad (3)$$

$$Q = 3UI \sin \varphi; \quad (4)$$

$$S = 3UI, \quad (5)$$

где U и I — действующие значения напряжения и тока.

Ниже предложены различные модификации стандартных определений мощности при несинусоидальных, непериодических и других режимах.

Существуют два типа представления мгновенной реактивной мощности [1 – 3]: по теории Фризе (Fryze) и по $p-q$ теории Акаги (Akagi). В теории Фризе для ЭЭС ток источника $i(t)$ представляется двумя составляющими — мгновенными значениями активной $i_a(t)$ и неактивной $i_n(t)$ мощности:

$$i_a(t) = \frac{P}{|u|^2} u(t); \quad i_n(t) = i(t) - i_a(t), \quad (6)$$

где $|u| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$; P — действующее значение

мощности за период — $p(t) = u(t)i(t)$, причем $|i|^2 = |i_a|^2 + |i_n|^2$.

При синусоидальном напряжении (без гармоник) $|u| = U$. Токи $i_a(t)$ и $i_n(t)$ взаимно перпендикулярны, следовательно

$$\int_0^T i_a(t)i_n(t)dt = 0. \quad (7)$$

Действующее значение неактивной мощности $Q = |u||i_n|$.

Эта теория применима не только к синусоидальным токам и напряжениям, но и к несинусоидальным.

В [2, 4] предложена $p - q$ теория вычисления мгновенной активной и реактивной мощности в неподвижной декартовой системе перпендикулярных осей α, β :

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta; \quad (8)$$

$$q = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta, \quad (9)$$

где u_α, u_β и i_α, i_β — проекции напряжения и тока на оси α и β .

В этих уравнениях нет нулевой составляющей тока i_0 , т. е. отсутствует вклад в нее токов i_α, i_β . Это можно использовать при компенсации несимметричных режимов в трехпроводных электрических сетях.

Теория $p - q$ мощностей была расширена и для четырехпроводных систем путем введения нулевой составляющей. При этом система принимается симметричной. Однако при наличии гармоник появляются ошибки при вычислении неактивной мощности, поэтому необходимо использовать действующие значения мощностей, для расчета которых нужно хотя бы на интервале в полпериода иметь выборку значений измеряемых величин. В связи с применением действующих значений полную компенсацию неактивной мощности можно получить только в статическом режиме.

Проекция тока на оси $d, q, 0$ можно получить с помощью его проекций на оси $\alpha, \beta, 0$ [6]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $\theta = \omega t = \arctg u_\beta/u_\alpha$; ω — угловая скорость вращения координатной системы $d, q, 0$.

При совпадении оси d с вектором напряжения $u_q = 0, u_d = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} = U$. Тогда

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{U} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta & 0 \\ -u_\beta & u_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Проекция токов i_d, i_q содержат постоянные и переменные составляющие:

$$i_d = i_{d=} + i_{d\approx}; \quad (12)$$

$$i_q = i_{q=} + i_{q\approx}. \quad (13)$$

В [5] предложены формулы для вычисления коэффициента мощности, а также активной и реактивной мощности во вращающихся осях $d, q, 0$:

$$\cos\varphi = \frac{i_q u_q + i_d u_d}{UI}; \quad \sin\varphi = \frac{i_q u_d - i_d u_q}{UI}; \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} p &= s \cos\varphi = UI \cos\varphi = i_q u_q + i_d u_d; \\ q &= s \sin\varphi = UI \sin\varphi = i_q u_d - i_d u_q; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где u_d, u_q, i_d, i_q — проекции напряжения и тока на оси d и q ; s, p, q — полная, активная и реактивная мощности; U, I — модули напряжения и тока.

Основное преимущество такого вычисления мгновенных активной и реактивной мощностей — отсутствие необходимости интегрирования, т. е. практически получить информацию о мощностях несложно. Поскольку векторы тока и напряжения в проекциях на осях $d, q, 0$ отражают мгновенные значения, то наличие гармоник полностью учтено в формулах (14) и (15). Кроме того, по осям $d, q, 0$ нет нулевой составляющей токов.

Классификация способов компенсации [7]

Пассивная компенсация осуществляется с помощью поперечных и продольных конденсаторов и дросселей, изменяющих емкость и индуктивность линии (они нерегулируемы, их параметры не могут изменяться непрерывно).

Активная компенсация обычно реализуется поперечными устройствами, поддерживающими постоянное напряжение на своем выходе. Они осуществляют ее, генерируя или потребляя необходимую реактивную мощность в зависимости от изменения напряжения в точке присоединения. Регулирование реактивной

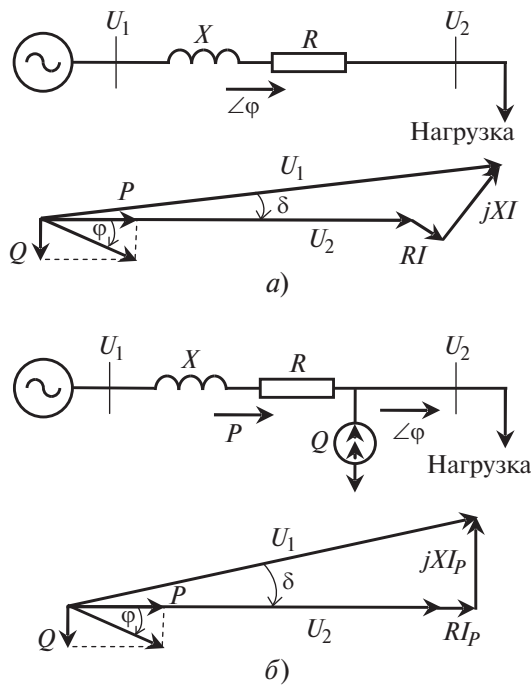


Рис. 1. Параллельная компенсация в радиальной ЭЭС:

a — без реактивной компенсации; *б* — компенсация с источником тока

мощности происходит плавно с достаточным быстродействием.

При *централизованной компенсации* на входе схемы электроснабжения компенсируется вся реактивная мощность. Данная схема удобна для стабильного поддержания заданного коэффициента нагрузки.

Групповая компенсация применяется на фидерах, питающих одну секцию, на которой следует осуществлять компенсацию. Данную схему удобно использовать в крупных схемах электроснабжения, секции которых имеют разные коэффициенты нагрузки.

Индивидуальная компенсация осуществляется непосредственно на нагрузке (особенно на мощных электродвигателях) в случаях, когда ее полная мощность превышает номинальную. Это наилучшее решение, поскольку реактивная мощность генерируется в том же месте, где потребляется, и может регулироваться в соответствии с нагрузкой.

При *нерегулируемой компенсации* используется один или несколько конденсаторов, обеспечивающих ее постоянный уровень. Управление может быть ручным, полуавтоматическим, с прямым подсоединением к нагрузке и включением-отключением вместе с ней.

Автоматическая компенсация — автоматическое поддержание заданного $\cos \varphi$ путем регулирования количества вырабатываемой

реактивной мощности в соответствии с изменениями нагрузки. Применяется там, где изменения активной и реактивной мощности относительно велики, например, на сборных шинах главного распределительного щита или на кабеле, питающем мощную нагрузку.

Динамическая компенсация используется для предотвращения колебаний напряжения в сетях с изменяющимися нагрузками. Вместе с нерегулируемой конденсаторной батареей применяется регулируемый компенсатор реактивной мощности, обеспечивающий емкостный/индуктивный ток. Быстрое регулирование обеспечивает изменяющуюся компенсацию для таких нагрузок, как лифты, дробилки, аппараты точечной сварки и т. д.

Параллельная компенсация. На рис. 1 показаны схемы параллельной компенсации в радиальных ЭЭС и соответствующие векторные диаграммы в случаях отсутствия реактивной компенсации (*a*) и наличия компенсации при индуктивной нагрузке (*б*). Как видно, при компенсации угол вектора тока связан с узлом нагрузки, т. е. активный ток I_p синфазен с вектором U_2 . При отсутствии компенсации (рис. 1, *a*) источник обеспечивает реактивную мощность, увеличивая ток генератора и ток, протекающий по линии. При близкой установке компенсатора к нагрузке (рис. 1, *б*) токи генератора и линии уменьшаются.

Продольная компенсация. Обычно для ее реализации используют конденсаторы (с целью уменьшения эквивалентного реактанса линии), которые генерируют реактивную мощность, регулируя и создавая баланс отдельных частей реактанса линии. При этом улучшается работа системы и оптимизируется распределение мощности по параллельным цепям. Как и поперечную компенсацию, продольную можно осуществить с помощью источника тока или напряжения. На рис. 2, *a* показана схема радиальной ЭЭС при отсутствии реактивной компенсации, а на рис. 2, *б* — при наличии компенсации с помощью источника напряжения, при которой в узле $U_2 \cos \varphi = 1$. Однако в этом случае напряжение компенсатора $U_{\text{ком}}$ подается между линией и нагрузкой для изменения угла напряжения нагрузки U'_2 . Соответствующим регулированием амплитуды $U_{\text{ком}}$ можно достичь $\cos \varphi = 1$. Из векторной диаграммы на рис. 2, *б* видно, что напряжение $U_{\text{ком}}$ находится в противофазе с падением напряжения на индуктивности, поскольку оно отстает от тока I_p .

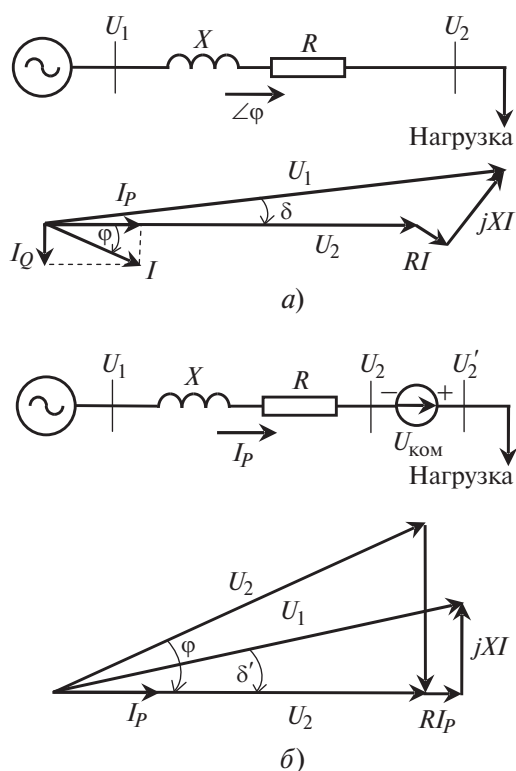


Рис. 2. Продольная компенсация в радиальной ЭЭС:

а — без реактивной компенсации; б — компенсация с источником напряжения

Средства компенсации реактивной мощности

Синхронные генераторы являются главными источниками реактивной мощности, обеспечивающими необходимые уровни напряжения. Однако их возможность потреблять/генерировать реактивную мощность зависит от граничных значений возбуждения, определяемых термическими ограничениями и статической устойчивостью.

Синхронные компенсаторы, генерирующие реактивную мощность, управляемую путем изменения их возбуждения, допускают кратковременные перегрузки. Однако из-за их инерционности иногда возможно увеличение токов КЗ. Кроме того, они дороги и малонадежны.

Поперечные конденсаторы чаще всего используются для компенсации благодаря их надежности, небольшой стоимости и стойкости к перегрузкам. Однако переключаемые конденсаторы вследствие инерционности не могут улучшить устойчивость системы. Кроме того, они менее эффективны в динамических режимах, чем синхронные генераторы и синхронные статические компенсаторы, так как компенсируемая реактивная мощность является функцией напряжения сети.

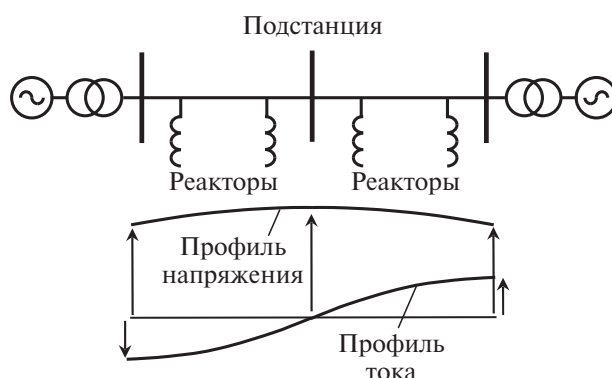


Рис. 3. Поперечные реакторы (расположены по длине линии)

Поперечные реакторы используются прежде всего для поддержания напряжения в статических режимах при низких нагрузках и больших емкостях высоковольтных линий, а **продольные реакторы** — для ограничения потока мощности в линиях с множеством параллельных цепей, у которых пропускная способность ограничена (по температуре). Поэтому потоки направляются в цепи, имеющие достаточную пропускную способность.

Статические компенсаторы (тиристорно управляемые реакторы, тиристорно управляемые конденсаторы и др.) содержат обычный компенсатор, а также обычный и вентильный переключатели, с помощью которых регулируется реактивная мощность. Они способны непрерывно управлять выходной реактивной мощностью и регулировать напряжение. Однако они дороги и используются в случае необходимости большого быстрого действия и независимости управления. Кроме того, они являются источниками гармоник, требующих подавления.

В настоящее время широкое применение получили высоконадежные статические синхронные компенсаторы (ССК) [6].

Поперечные переключаемые реакторы (ППР) — рис. 3 — ограничивают повышение напряжения при малых нагрузках. В длинных линиях их располагают посередине. Напряжения на обоих концах линии равны по амплитуде и фазе, а токи равны по амплитуде, но противоположны по фазе.

Вдоль линии на равных расстояниях друг от друга могут находиться несколько поперечных реакторов. Реактивное сопротивление каждого поперечного реактора на обоих концах линии в 2 раза больше, чем у реакторов, расположенных в середине линии. На рис. 4 реактор, расположенный на генераторном конце линии, практически компенсирует только утечки. Если исключить реактор со

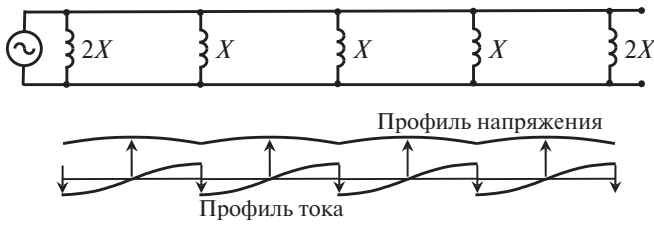


Рис. 4. Распределенные поперечные реакторы в длинной линии

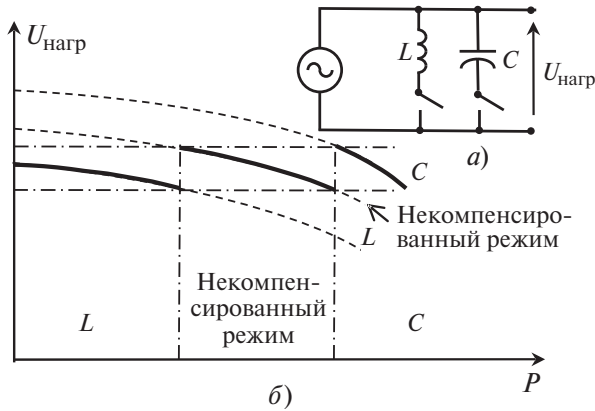


Рис. 5. Управление напряжением путем переключения параллельных реакторов

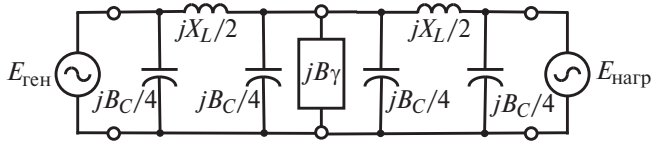


Рис. 6. Поперечный компенсатор в середине линии

стороны генератора, последний должен потреблять реактивный ток от ближайшей левой половины секции. Каждый реактор, находящийся в середине, потребляет зарядный ток линии и реактивную мощность от двух полусекций линии, а реакторы на каждом конце линии — только от полусекции с одной стороны. Этим и объясняется, почему реактивное сопротивление средних реакторов в 2 раза меньше, чем реакторов, расположенных на концах линии.

На рис. 5, а показана схема управления напряжением путем переключения параллельных реакторов, а на рис. 5, б — соответствующий график. Линия L относится к случаю присоединения реактора, а линия C — присоединения конденсатора. Напряжение на конце питающей линии можно поддерживать в узком диапазоне при изменении нагрузки, включая и отключая реактор и конденсатор.

На рис. 6 приведена схема симметричной линии с компенсатором в середине, имеющим

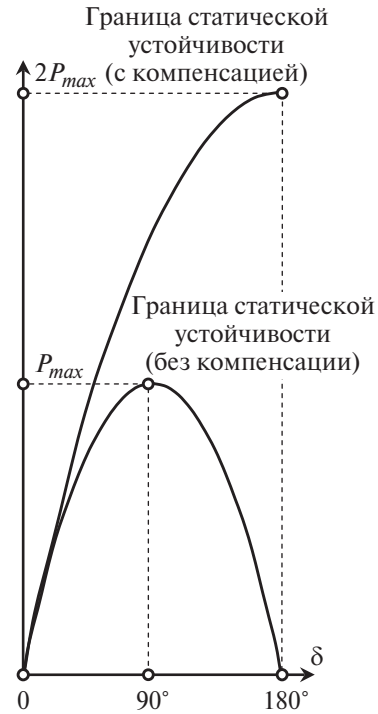


Рис. 7. Характеристика мощности при динамической поперечной компенсации

проводимость $jB_Г$. Каждая половина линии представлена эквивалентной π -секцией.

Если компенсатор способен изменять свою проводимость непрерывно таким образом, чтобы поддерживать $U_m = E$, то в статическом режиме линия окажется разделенной на две независимые половины, мощность каждой из которых

$$P = \frac{2E^2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2}. \quad (16)$$

Максимальная передаваемая мощность $2E^2/X_L$ в 2 раза больше мощности при некомпенсированной линии, достигаемой при $\delta/2 = \pi/2$, в середине каждой половины линии (рис. 7).

Продольные компенсаторы используются для уменьшения реактивного сопротивления линии, что приводит к увеличению максимальной передаваемой мощности и уменьшению угла передачи до заданного уровня. Следовательно, линия потребляет меньше энергии заряда, чем при поперечной компенсации. Чаще всего продольная компенсация используется в длинных линиях, но иногда и для распределения мощностей между параллельными линиями. При вполне компенсированной линии резонансная частота равна частоте системы, поэтому степень

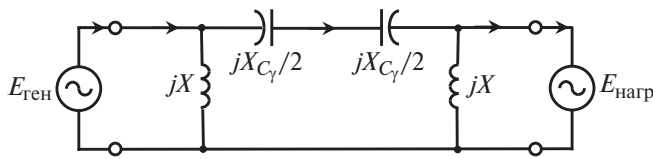


Рис. 8. Продольный конденсатор линии

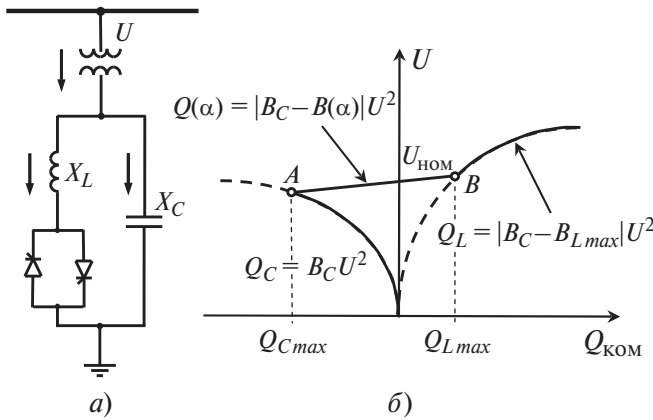


Рис. 9. Поперечный конденсатор с управляемым дросселем

демпфирования очень низка, и система чувствительна к небольшим ее изменениям.

Практически продольная компенсация выполняется с помощью одного или двух конденсаторов (рис. 8).

Гибкие распределительные сети [8 – 12]. С использованием силовых электронных приборов и цифровых систем управления были разработаны и внедрены устройства, непрерывно управляющие реактивными элементами сети (поперечными и продольными): гибкие распределительные сети (ГРС) в высоковольтных сетях и потребительские компенсаторы (ПК) — в низковольтных.

В зависимости от схемы включения ГРС классифицируются как поперечные, продольные, продольно-поперечные, а в зависимости от объекта регулирования — как ГРС с регулированием импеданса и регулированием напряжения. В свою очередь ГРС с регулированием импеданса подразделяются на поперечный компенсатор импеданса (ПКИ), продольный емкостный компенсатор (ПЕК), трансформатор с переключением фаз, смешанный поперечно-продольный компенсатор. ГРС с регулированием напряжения подразделяются на поперечный статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ), продольный синхронный компенсатор (ПСК), поперечно-продольный унифицированный контроллер потокораспределения (УКПР), поперечно-продольный межлинейный контроллер потокораспределения.

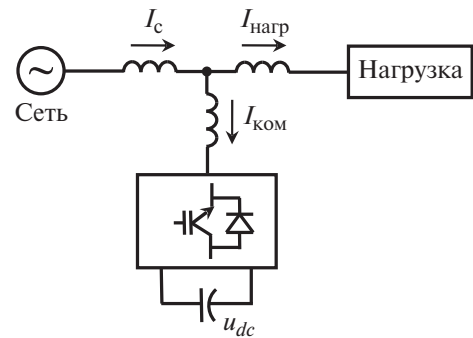


Рис. 10. Статический синхронный компенсатор

Действие *статического компенсатора напряжения* (СКН) аналогично поперечному включению реактивного сопротивления, которое генерирует (или поглощает) реактивную энергию для регулирования напряжения в узле включения. СКН, представляющий собой параллельно включенные конденсатор и регулируемый реактор (рис. 9, а), обладает очень высоким быстродействием, что расширяет границы устойчивости ЭЭС. Количество обмениваемой (поглощаемой, генерируемой) с сетью реактивной энергии зависит от напряжения в узле присоединения. При номинальном напряжении компенсатор имеет линейную характеристику, которая ограничена номинальной мощностью конденсатора и реактора (рис. 9, б). Далее характеристика становится нелинейной, что является недостатком этого компенсатора.

СКН увеличивают пропускную способность длинных линий, улучшают устойчивость, демпфируют низкочастотные и подсинхронные колебания, регулируют динамические перенапряжения. С помощью тиристорov регулируется индуктивный ток, изменяя общий характер тока компенсатора. Этот компенсатор может работать параллельно с постоянными переключаемыми конденсаторами.

Статические синхронные компенсаторы СТАТКОМ (рис. 10) [11], как и СКН, регулируют напряжение, однако независимо от напряжения в узле. СТАТКОМ может генерировать и потреблять реактивную мощность путем управления амплитудой и углом выходного напряжения.

При пренебрежении потерями реактивная мощность компенсатора СТАТКОМ

$$Q_{uR} = \frac{|U_l|^2 - |U_l||U_{uR}|}{X_{uR}}. \quad (17)$$

При $|U_l| > |U_{uR}|$ значение Q_{uR} — положительное, а при $|U_l| < |U_{uR}|$ — отрицательное

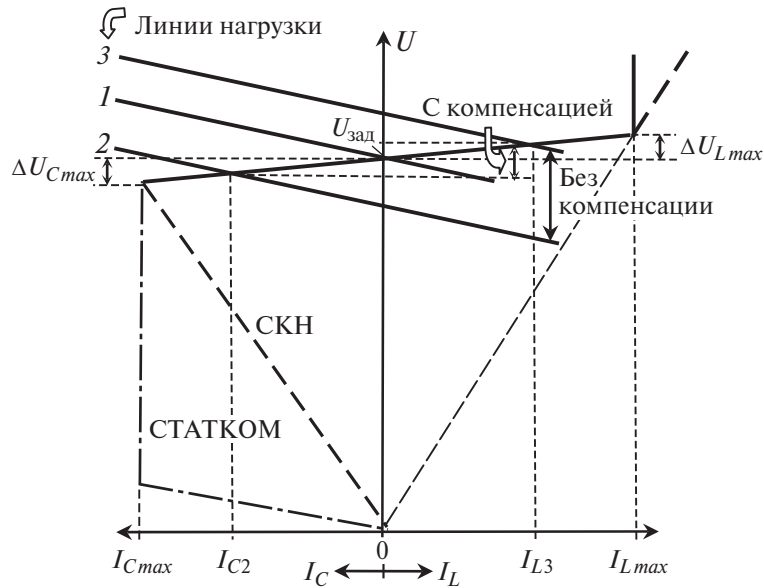


Рис. 11. Вольтамперные характеристики статического компенсатора напряжения СКН и статического синхронного компенсатора СТАТКОМ

(соответственно потребляет и генерирует реактивную мощность). Необходимо отметить, что верхняя и нижняя границы для $|U_{uR}|$ определяются значением емкости конденсатора. Кроме того, Q_{uR} может принимать значения в диапазоне $0 \div 2\pi$, однако практически оно остается близким к Q_I .

Не всегда статические компенсаторы используют для поддержания определенного напряжения. Иногда их применяют для того, чтобы последнее изменялось пропорционально току компенсации, что можно легко достичь путем простого управления. Заданный сигнал управления компенсатором получают в виде суммы сигнала задания по напряжению $U_{зад}$ и сигнала, пропорционального амплитуде тока компенсации, kI_Q с соответствующей полярностью (емкостный ток — отрицательный, а индуктивный ток — положительный) [10]:

$$U_{зад}^* = U_{зад} + kI_Q, \quad (18)$$

где

$$k = \frac{\Delta U_{Cmax}}{I_{Cmax}} = \frac{\Delta U_{Lmax}}{I_{Lmax}} \quad (19)$$

— статизм регулирования (рис. 11); ΔU_{Cmax} — уменьшение напряжения относительно номинального при максимальном емкостном токе I_{Cmax} ; ΔU_{Lmax} — увеличение напряжения относительно номинального при максимальном индуктивном токе I_{Lmax} .

Амплитуда напряжения на выходе компенсатора U регулируется по семейству линейных статических характеристик в зависимости от нагрузок во всем диапазоне регулирования (см. рис. 11). При использовании компенсатора СТАТКОМ ток компенсации будет иметь максимальное значение I_{Cmax} или I_{Lmax} , а у компенсаторов с переключением конденсаторов или реакторов и у компенсаторов с переменным реактансом (статических компенсаторов напряжения СКН) ток компенсации будет изменяться. Линия нагрузки 1 пересекает вольтамперную характеристику при $U_{зад} = U_{ном}$, поэтому $I_Q = 0$. Линия нагрузки 2 находится ниже линии 1 из-за уменьшения напряжения сети (например, при отключении генератора). Точка пересечения с вольтамперной характеристикой соответствует емкостному току компенсации I_{C2} . Линия нагрузки 3 располагается выше линии 1 из-за повышения напряжения сети (например, при отключении нагрузки). Ее пересечение с вольтамперной характеристикой соответствует индуктивному току компенсации I_{L3} . Точки пересечения линий нагрузки 2 и 3 с ординатой (осью U) определяют изменение напряжения без компенсации. Изменение напряжения при компенсации на линейном участке в статическом режиме определяется только статизмом регулирования независимо от типа компенсатора. Динамические характеристики компенсаторов обоих типов также различаются.

Продольный емкостный компенсатор ПЕК — см. рис. 12. С помощью тиристоров регулируется индуктивная составляющая тока ком-

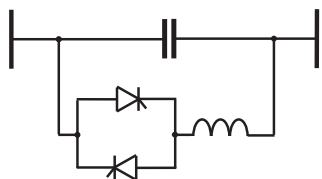


Рис. 12. Продольный регулируемый емкостный компенсатор

пенсатора и таким образом изменяется общий характер его тока, который определяется повышающим коэффициентом $K_{\Pi} = X_{\text{экв}}/X_C$, где $X_{\text{экв}}$ — эквивалентное сопротивление. На рис. 13 показана зависимость этого коэффициента от угла проводимости тиристоров β . ПЕК изменяют электрическую длину линии с незначительным запаздыванием, благодаря чему регулируется потокораспределение. Кроме того, они расширяют границы устойчивости ЭЭС и демпфируют низкочастотные колебания и подсинхронный резонанс.

Передаваемая регулируемая активная мощность

$$P_{lm}^{\text{рег}} = \frac{\|U_l\| \|U_m\|}{X_{\text{УПК}}} \sin(\theta_l - \theta_{uR}). \quad (20)$$

Проблемы, возникающие при подсинхронном резонансе, препятствуют широкому применению неуправляемых УПК и делают предпочтительным использование управляемых ПЭК. Эти компенсаторы могут работать в четырех режимах в зависимости от способа управления.

1. *Блокирующий режим.* Вентили закрыты, и ток протекает только через конденсатор. В данном режиме компенсатор работает как неизменный последовательный конденсатор, при этом $K_{\Pi} = 1$.

2. *Шунтирующий режим.* Вентили управляются непрерывно и шунтируют конденсатор, при этом сопротивление имеет индуктивный характер. При $X_C/X_L \gg 1$ напряжение на конденсаторе гораздо меньше, чем в блокирующем режиме, поэтому данный режим используется для уменьшения нагрузки конденсатора при КЗ.

3. *Емкостный повышающий режим.* При отпирании вентиля раньше момента, когда U_C становится равным нулю, возникает разрядный импульс тока конденсатора, замыкающийся через параллельную индуктивную цепь. Этот ток добавляется к току в цепи с конденсатором. Поперечный компенсатор импеданса ПКИ работает в этом режиме при $0 < \beta < \alpha_{\infty}$ (см. рис. 13).

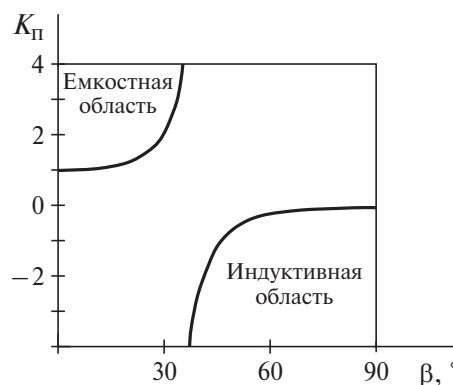


Рис. 13. Зависимость повышающего коэффициента от β

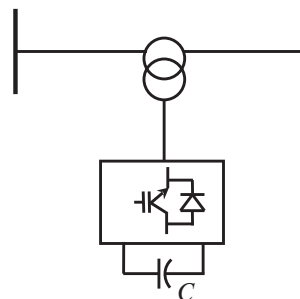


Рис. 14. Продольный синхронный компенсатор

4. *Индуктивный повышающий режим* имеет место при превышении углом проводимости значения α_{∞} . При этом форма кривой напряжения становится несинусоидальной.

Продольный синхронный компенсатор ПСК (рис. 14) [10] представляет собой последовательно включенный источник напряжения, работающий без внешнего источника питания. Его выходное напряжение регулируется независимо от тока линии. Он предназначен для повышения/понижения суммарного реактивного падения напряжения на линии и, следовательно, для управления передаваемой электрической мощностью. ПСК может включать в себя устройства, временно потребляющие мощность, для улучшения динамических характеристик энергосистемы путем дополнительной компенсации активной мощности и регулирования таким образом активного падения напряжения на линии. Обычно последовательно вводимое напряжение имеет небольшую амплитуду по сравнению с амплитудой напряжения на линии.

ПСК может быть использован как *динамический компенсатор провалов напряжения*. Он не потребляет реактивную мощность из сети, поскольку получает ее от своего конденсатора. Таким образом, компенсатор может регулировать активную и реактивную

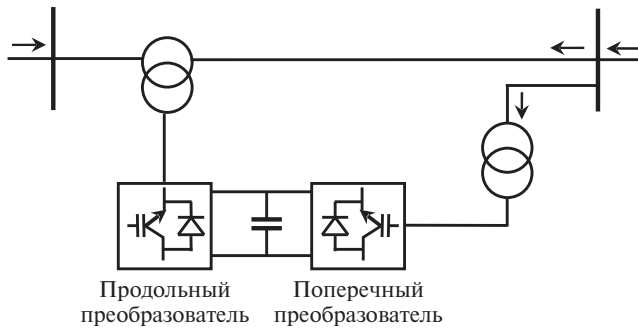


Рис. 15. Универсальный контроллер потокораспределения

мощность в границах, определяемых его мощностью.

Универсальный контроллер потокораспределения УКПР (рис. 15) [9] представляет собой сочетание компенсаторов СТАТКОМ и ПСК, имеющих общий конденсатор на стороне постоянного тока и общую систему управления. Он может одновременно управлять активным и реактивным потоками мощности и напряжением на выходе, причем каждым из них отдельно и в любой комбинации. Необходимая активная энергия для продольного преобразователя берется из поперечного преобразователя со стороны постоянного тока. Управляя амплитудой и фазой вводимого продольного напряжения U_{CR} , можно управлять активным и реактивным потоками мощности.

На рис. 16 показаны векторные диаграммы, поясняющие основные функции управления УКПР: регулирование напряжения подобно

трансформатору со ступенчатым регулированием, где $U_{pq} = \Delta U$ добавляется синфазно или в противофазе (а); последовательная емкостная компенсация, где $U_{pq} = U_C$ добавляется с углом сдвига к току линии I (б), равным 90° ; регулирование фазового угла линии (смещение по фазе), где $U_{pq} = U_\sigma$ добавляется к U_0 , при этом достигается желаемое фазовое смещение σ (опережающее или отстающее) без изменения амплитуды (в); многофункциональное управление потокораспределением: одновременное регулирование напряжения, последовательная емкостная компенсация линии и фазовое смещение, где $U_{pq} = \Delta U + U_C + U_\sigma$ (г).

Основным преимуществом УКПР является гибкость управления (благодаря наличию трех степеней свободы), обеспечивающая возможность регулирования трех величин — напряжения сети, активного и реактивного потоков мощности.

Управление компенсацией

Компенсацию характеризуют следующие параметры: направленность (потребление, генерация), степень, частота и продолжительность реализации, быстродействие, независимость управления, вклад в токи КЗ. Управление компенсацией реактивной мощности можно классифицировать по иерархическим уровням, по времени воздействия, по используемым методам автоматического управления.

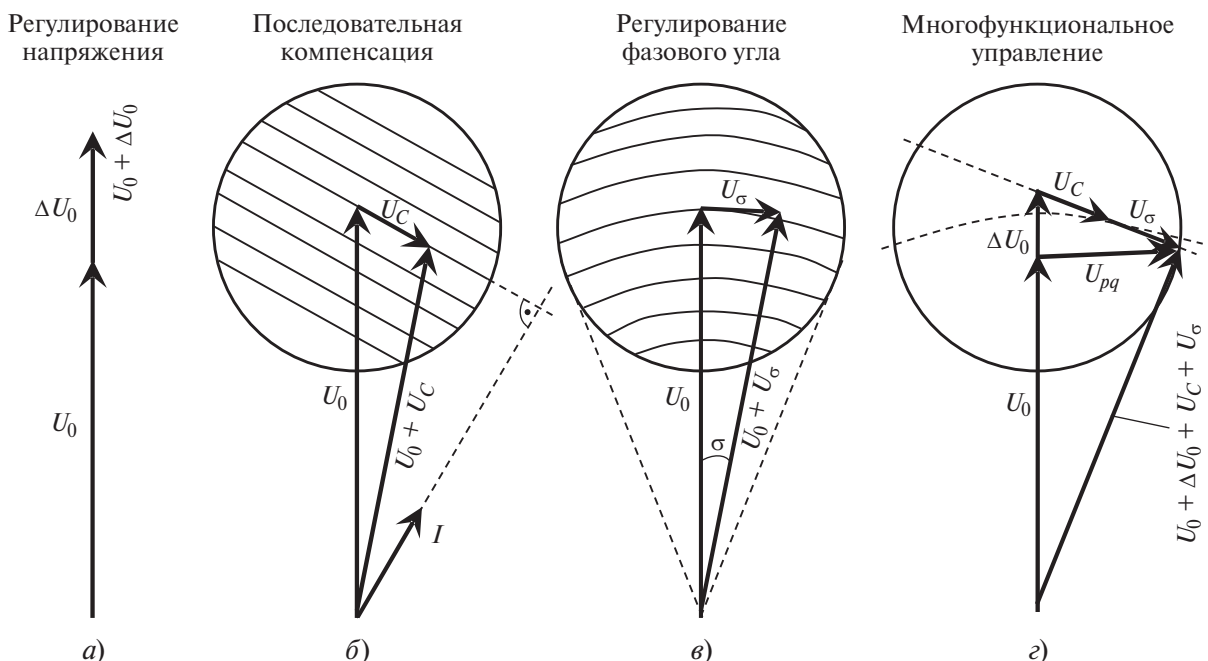


Рис. 16. Основные функции управления УКПР

Для получения оптимальных напряжения и потока реактивной мощности в соответствии с целевой функцией и ограничениями режимов требуется координация управления компенсаторами в сети. Целью является поддержание напряжения в определенных границах при изменении нагрузок, а также минимизация потерь мощности. Эта оптимизационная задача, решаемая при планировании и диспетчеризации реактивной компенсации, включает в себя выбор расположения компенсаторов, их мощности и функций управления, а также последовательности переключений отпаек трансформаторов.

При изменении нагрузок и структуры сети необходимо управлять напряжениями в ее узлах для повышения устойчивости системы и обеспечения максимального использования сети и, как следствие, — минимизации реактивной мощности и потерь. Управление часто разделяют на нормальное, предохранительное и аварийное. *Первичный контроль* осуществляется с помощью автоматических регуляторов напряжения синхронных генераторов в течение несколько секунд. Дополнительно используются системные стабилизаторы в контуре возбуждения, которые компенсируют запаздывание в нем, модулируя напряжение на зажимах и демпфируя низкочастотные электромеханические колебания. *Вторичный контроль* реализуется с помощью управляемых компенсаторов во временном интервале от 1 с до нескольких минут с целью поддержания соответствующей формы кривой напряжения в сети, минимизации реактивных потоков и максимизации резерва реактивной мощности. *Третичный контроль* длительностью от 10 до 30 мин называется оптимальным управлением реактивных потоков. Режим работы определяется как функция затрат, которая минимизируется с помощью нелинейных оптимизационных методов. Уравнения потокораспределения записывают в виде ограничений и представляют равенствами, а ограничения режима — неравенствами.

Контроллеры управления являются важной частью компенсаторов реактивной мощности. От них зависят как статические, так и динамические характеристики компенсации. В большинстве контроллеров используются пропорционально-интегральные (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы [13], поскольку регулируемые процессы протекают сравнительно медленно. В последние годы широкое применение находят контроллеры на базе раз-

мытой логики [13, 14]. Используются также нейронные сети для синтеза контроллеров управления компенсаторов [15] на базе модели вход-выход с большим числом распределенных связей из простых единиц, обладающих адаптивностью к изменяющейся среде.

Существуют три категории связей нейронных сетей: прямая связь, обратная связь и конкурентное обучение. В сети первой категории через входы непосредственно вычисляются выходные сигналы без обратной связи. В сети второй категории — динамической — есть обратная связь вход-выход. В сети третьей категории выходные сигналы вычисляют, основываясь на некоторых измерениях расстояния между входами и выходами. Первые сети используются для идентификации структуры и аппроксимации функции, вторые — как объединенная память, а третьи — для классификации структуры. Используются и контроллеры на базе скользящего режима [16].

Эффекты компенсации

Управление компенсаторами осуществляется с помощью преобразователей, использующих вентили различного типа: тиристоры, GTO тиристоры, IGBT и IGCT транзисторы. Вентили GTO, IGBT и IGCT — двусторонне управляемые (путем как их отпираания, так и запираания). Благодаря этому преобразователи имеют возможности:

- обеспечить получение как емкостной, так и индуктивной мощности при значительном уменьшении габаритов конденсаторов и реакторов. Это снижает вероятность возникновения резонанса в критических режимах;

- точно и непрерывно регулировать реактивную мощность благодаря быстродействию преобразователей, которое намного выше частоты сети;

- использовать широтно-импульсную модуляцию высокой несущей частоты, в результате чего уменьшается уровень гармоник питающего тока и таким образом снижается потребность в фильтрах;

- не генерировать зарядный ток;

- иметь улучшенные динамические характеристики при изменении напряжения и в переходных режимах;

- генерировать номинальный реактивный ток даже при очень низком напряжении сети;

- с помощью соответствующего управления работать как активные фильтры, динамические компенсаторы напряжения, универсальные контроллеры мощности.

Управление компенсацией реактивной мощности позволяет:

регулировать по заданию потокораспределение (исходя из нужд потребителей, необходимости обеспечения оптимального потока, а также в критических режимах);

повысить пропускную способность линий с учетом их термической стойкости, которая изменяется в широких пределах в зависимости от погоды и предыдущей нагрузки. Это можно сделать, преодолевая другие ограничения и распределяя мощность по линиям в соответствии с их пропускной способностью;

увеличить безопасность системы путем расширения границ устойчивости, ограничения токов КЗ и перегрузки, управления каскадными отключениями и демпфирования электромеханических колебаний в машинах и системе;

обеспечить безопасное подключение линий к соседним потребителям и регионам и исключить таким образом требование о необходимости генерации с двух сторон;

обеспечить большую гибкость размещения новых генераторов;

осуществить реконструкцию и модернизацию линий;

уменьшить реактивные потоки и, следовательно, передавать большую активную мощность;

уменьшить замкнутые потоки;

увеличить использование более дешевой электроэнергии за счет применения межсистемных связей.

Таким образом, компенсация реактивной мощности необходима для обеспечения надежной и эффективной работы ЭЭС. В настоящее время разработано множество методов и средств управления реактивной мощностью, при использовании которых улучшаются все характеристики и параметры работы ЭЭС.

Список литературы

1. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. — IEEE Press, 2007.
2. Emanuel A. E. Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow. — John Wiley & Sons, 2010.
3. Xu Yan. A Generalized Instantaneous Nonactive Power Theory for Parallel Nonactive Power Compensation: Dissertation of Doctor of Philosophy. — The University of Tennessee, 2006, may.
4. Akagi H., Nabae A. The $p - q$ Theory in Three-Phase System under Non-Sinusoidal Conditions. — ETEP, 1993, vol. 3.
5. Сендюров В. М. Выражение коэффициента мощности синхронной машины в системе осей $d, q, 0$. — Электричество, 1964, № 7.
6. Power Electronic Control in Electrical Systems / E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T. J. E. Miller. — Newnes, 2002.
7. Reactive power compensation technologies, State-of-the-art: Review / J. Dixon, L. Morán, J. Rodríguez, R. Domke. — Proceedings of the IEEE, vol. 93, 2005, no. 12.
8. Padiyar K. R. FACTS controllers in power transmission and distribution. — New Age International Publishers, 2008.
9. Gyugyi L. Unified power flow control concept for flexible AC transmission systems. — Proc. Inst. Elect. Eng. C, vol. 139, 1992, no. 4.
10. Gyugyi L., Sen K. K. Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines. — IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 2, 1997, no. 1.
11. Gyugyi L., Otto R., Putman T. Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators. — IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-97, 1980, no. 5.
12. Karuppanan P., Kamala K. M. PI, PID and Fuzzy logic controller for Reactive Power and Harmonic Compensation. — ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering, vol. 1, 2010, no. 3.
13. Dash P. K., Mishra S., Panda G. Damping Multimodal Power System Oscillation Using a Hybrid Fuzzy Controller for Series Connected Facts Devices. — IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, 2000, no. 4.
14. El-Moursi M. S., Sharaf A. M. Novel Controllers for the 48-Pulse VSC STATCOM and SSSC for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation. — IEEE Trans. on Power Systems, vol. 20, 2005, no. 4.
15. Encarnação L., Silva J. F., Soares V. Reactive Power Compensation using Sliding-Mode Controlled Three-Phase Multilevel Converters. — IEEE Conf., 2004.
16. Mousavi O. A., Cherkaoui R. Literature Survey on Fundamental Issues of Voltage and Reactive Power Control Literature Survey: MARS Project. — EPF Lausanne — Power System Group, 2011, june.

jagarov@ieeegb