

- В связи с существенным увеличением стоимости строительства новых высоковольтных линий электропередачи возрастает роль повышения пропускной способности существующих и вновь сооружаемых ВЛ. Становится экономически выгодным увеличивать передаваемую по линии мощность вплоть до ограничения по нагреву за счет применения различных устройств.

О технологиях управляемой компенсации реактивной мощности Валерий Иванович Кочкин рассказал в прошлом номере нашего журнала («Новости ЭлектроТехники» № 3(45) 2007). Сегодня автор останавливается на устройствах современной силовой электроники, созданных для управления работой электропередачи.



НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛЭП

Управляемая передача мощности

Валерий Кочкин, д.т.н., зав. отделом средств регулирования напряжения и реактивной мощности в электрических сетях, Филиал ОАО «НТЦ Электроэнергетики» – ВНИИЭ, г. Москва

Пропускная способность линий 220–750 кВ ограничивается нагревом проводов и устойчивостью электропередачи (рис. 1). Причем с увеличением длины линий второй фактор (устойчивость) определяет предел передаваемой мощности. Известно, что передаваемая по линии без потерь активная мощность (АМ) и потребляемая по ее концам реактивная мощность (РМ) в зависимости от угла передачи δ определяются как:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \delta; Q_1 = \frac{U_1(U_1 - U_2 \cos \delta)}{X_L}; Q_2 = \frac{U_2(U_2 - U_1 \cos \delta)}{X_L}, \quad (1)$$

где U_1, U_2 – напряжения в начале и в конце линии;
 X_L – индуктивное сопротивление линии;
 δ – угол между векторами \vec{U}_1 и \vec{U}_2 .

Ограничения передаваемой мощности P_0 вызваны необходимостью обеспечить статическую устойчивость в нормальном режиме с коэффициентом запаса по передаваемой мощности:

$$K_{\text{Рзап}} = \frac{P_{\text{пр}} - P_0}{P_0} 100\% > 20\%, \quad (2)$$

где предельная мощность $P_{\text{пр}} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L}$ при $\delta = \pi / 2$.

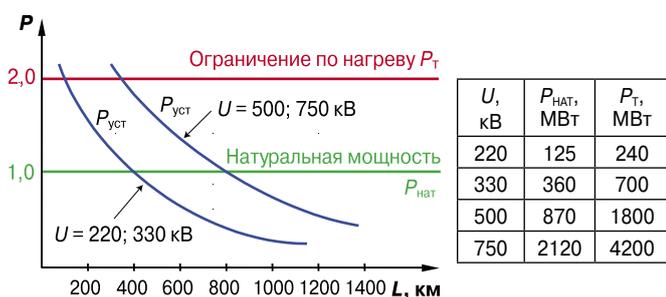
Также нужно обеспечить динамическую устойчивость в аварийном режиме и передачу требуемой мощности по ЛЭП в послеаварийном режиме с запасом $K_{\text{Рзап}} \geq 8\%$.

Как следует из выражения (1), предел передаваемой мощности $P_{\text{пр}}$ длинных ВЛ может быть увеличен за счет снижения сопротивления линии путем:

- деления линии на части при установке в середине линии статического тиристорного компенсатора реактивной мощности (СТК).

■ Рис. 1

Пропускная способность ВЛ



Существенное повышение пропускной способности ЛЭП происходит в диапазоне углов $90^\circ < \delta \leq 180^\circ$ или в так называемой зоне искусственной устойчивости, в которой аварийное отключение СТК может привести к потере устойчивости электропередачи;

- введения в линию устройства продольной компенсации (ПК) с емкостным сопротивлением X_C . Кроме повышения пропускной способности линии, ПК позволяет перераспределять мощность между параллельными линиями электропередачи за счет изменения сопротивления ВЛ.

Для перераспределения мощности между параллельными связями неодинаковой длины, а также разных классов напряжений применяют фазопоротные устройства (ФПУ).

Установка СТК

Эффект подключения СТК в середине линии показан на рис. 2. СТК, состоящий из конденсаторной батареи X_C с выключателем В (механическим или тиристорным) и управляемым тиристорным ключом ТК реактором X_L (рис. 2 а), имеет в замкнутом регулятором напряжения контуре характеристику, показанную на рис. 2 б. В регулировочном диапазоне от I_{C1} до I_{C2} характеристика имеет наклон (2–5%), определяемый статизмом K_{CT} . За пределами диапазона регулирования характеристика изменяется по линейному закону, зависящему от величины напряжения U и параметров X_C и X_L .

В схеме замещения (рис. 2 в) СТК представлен источником напряжения с $U_4 = U_{уст}$, где уставка $U_{уст}$ – значение напряжения при нулевой

РМ компенсатора, а также сопротивлением $X_K = \frac{K_{CT} U_{уст}^2}{Q_{НОМ}}$.

Из схемы замещения нетрудно получить выражения для определения новых характеристик линии:

$$P^* = \frac{P}{P_{\text{пр}}} = \frac{1}{1+K} (K \sin \delta + 2 \sin \frac{\delta}{2})$$

$$q = \frac{Q_K}{P_{\text{пр}}} = \frac{4(1 - \cos \frac{\delta}{2})(1 + \cos \frac{\delta}{2})}{(1+K)^2}$$

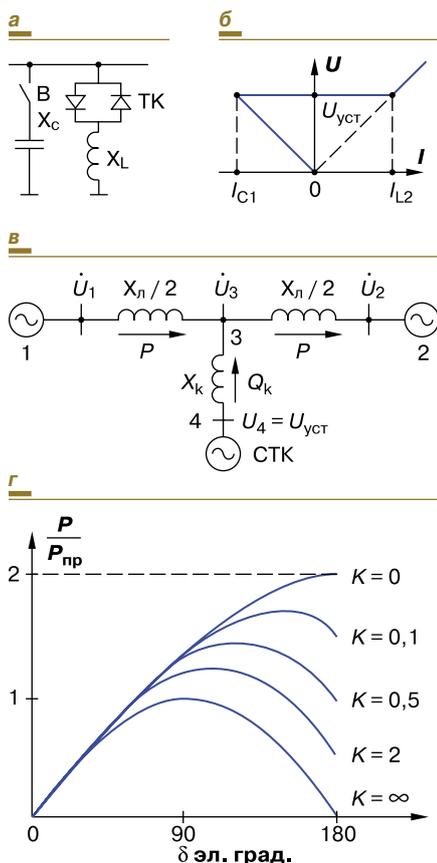
$$U^* = \frac{U_3}{U} = \frac{1 + K \cos \frac{\delta}{2}}{1+K} \quad (3)$$

где $K = \frac{4X_K}{X_L}$, $U = U_1 = U_2$.

При отсутствии СТК ($K = \infty, K_{CT} = \infty$ и $Q_K = 0$) получаем известные выражения для мощности и напряжения в середине линии:

$$\frac{P}{P_{\text{пр}}} = \sin \delta, \quad \frac{U_3}{U} = \cos \frac{\delta}{2}$$

Рис. 2 СТК в середине линии



Наличие СТК с нулевым статизмом ($K_{CT} = 0$ и $K = 0$) вдвое увеличивает передаваемую АМ $\frac{P}{P_{пр}} = 2 \sin \delta$ при $\delta = 180$ эл. град. Однако для этого потребуется мощность компенсатора, равная $\frac{Q_K}{Q_{пр}} = 4$. Харак-

теристики передаваемой мощности в диапазоне изменений $K = 0 \div \infty$ приведены на рис. 2 г. Очевидно, что увеличение передаваемой мощности достигается за счет возрастания мощности (стоимости) компенсатора и определяется технико-экономическим расчетом.

Как следует из анализа характеристик рис. 2 г, существенное повышение пропускной способности ЛЭП происходит в диапазоне углов $90^\circ < \delta \leq 180^\circ$ или так называемой зоне искусственной устойчивости, в которой аварийное отключение СТК может привести к потере устойчивости электропередачи. Отметим, что дальнейшее деление участков ВЛ с подключением СТК в точках деления теоретически может увеличить передаваемую мощность в 4, 8 и т.д. раз.

Установка устройства ПК

Продольная компенсация индуктивного сопротивления линии не приводит к смещению максимального значения мощности в зону искусственной устойчивости (рис. 3). При этом оптимальным местом расположения ПК является середина линии, так как напряжения на выводах конденсаторной батареи равны напряжениям по концам линии при ее 50%-й компенсации, когда $X_C = X_L / 2$ (рис. 3 г). В этом случае ток линии и передаваемая мощность возрастают вдвое $I_{лк} = \frac{U_{13}}{X_L / 2} = \frac{U_{12}}{X_L / 2} = 2 \frac{U_{12}}{X_L} = 2I_{л1}$. Фактически продольная компенсация увеличивает продольное напряжение линии на величину $\Delta U_C = jI_L X_C$, т.к. находится с U_{12} в фазе (рис. 3 в).

Установки продольной компенсации использовались в Советском Союзе на ВЛ 400 кВ Куйбышев – Москва и до настоящего времени работают на электропередаче Братск – Иркутск.

Заметим, что продольная компенсация, кроме повышения пропускной способности линии, позволяет перераспределять мощность между параллельными линиями электропередачи за счет изменения сопротивления ВЛ.

Рис. 3 Продольная компенсация

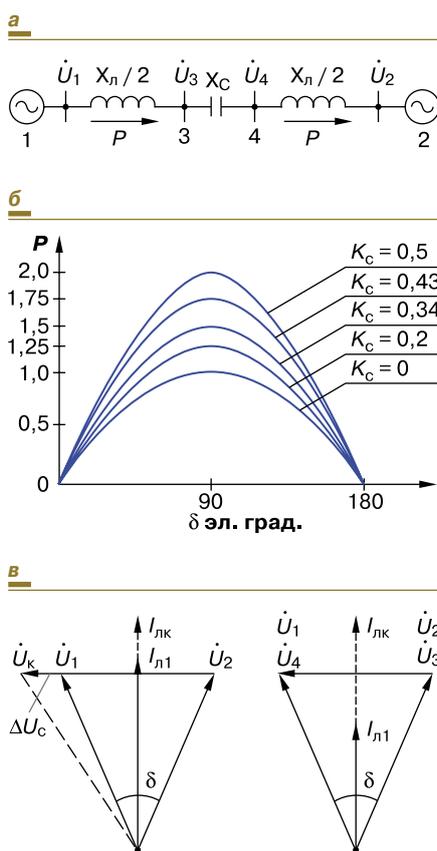
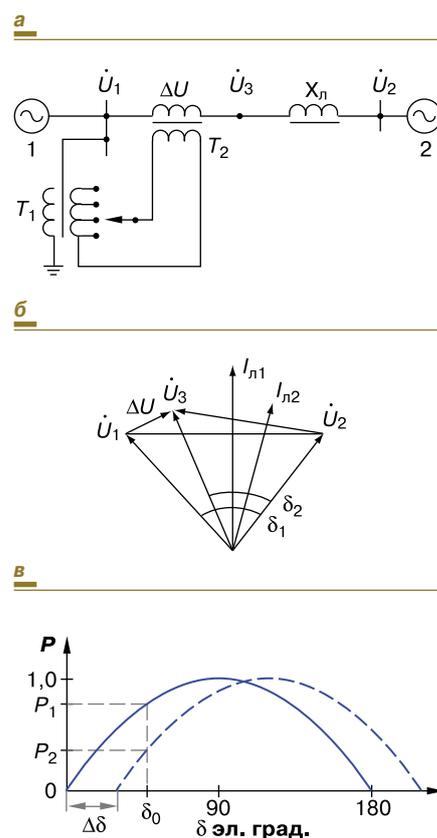


Рис. 3 Фазоповоротные устройства



Установка ФПУ

ФПУ воздействует на угол передачи δ и соответственно на изменение передаваемой по линии мощности (рис. 4). Простейшая схема ФПУ состоит из двух трансформаторов: параллельного T_1 и последовательного T_2 , создающего вектор дополнительного напряжения в линии (рис. 4 а), перпендикулярно направленного к вектору \dot{U}_1 , что изменит углы с δ_1 на δ_2 и ток линии с $I_{л1}$ на $I_{л2}$ (рис. 4 б). Перпендикулярное положение $\Delta \dot{U}$ обеспечивается подачей T_1 линейного напряжения на соответствующую фазу ВЛ. Как следует из угловой характеристики (рис. 4 в), ФПУ не изменяет амплитуду синусоиды и поэтому не повышает пропускную способность линии.

В последние годы регулирование напряжения ФПУ и угла δ осуществляют с помощью вакуумных или полупроводниковых переключателей для повышения срока службы коммутаторов.

Все эти устройства являются классическими и изменяют передаваемую по линии мощность, воздействуя на один из трех параметров: СТК – на напряжение, ПК – на сопротивление линии, а ФПУ – на угол передачи.

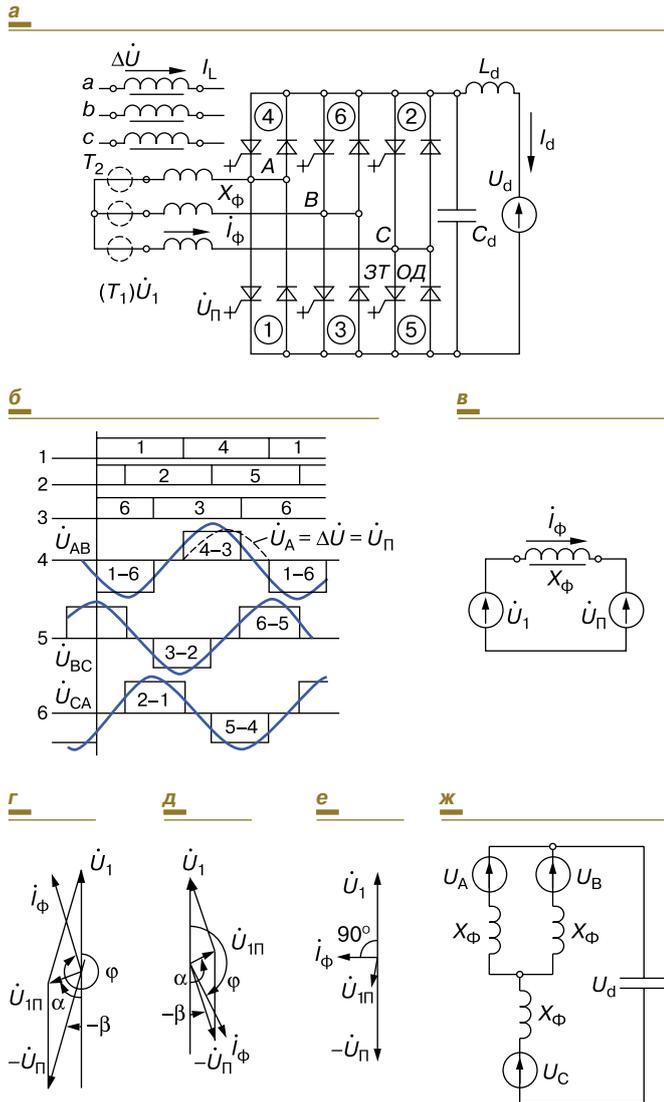
ГИБКИЕ ПЕРЕДАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Устройства на основе современной силовой электроники, созданные для управления работой электропередачи, способны одновременно воздействовать на три указанных выше параметра (U, X_L, δ), что повышает эффективность и обеспечивает гибкое управление режимами энергосистем. Такие технологии за рубежом называют FACTS (гибкие передающие системы переменного тока).

Их применение в электрических сетях Федеральной сетевой компании (ФСК) позволит решить следующие актуальные задачи:

- обеспечение выдачи вводимых в эксплуатацию мощностей электростанций и надежного подключения новых нагрузок потребителей;
- повышение управляемости потоками мощности в процессе передачи электроэнергии между энергорайонами;
- усиление межсистемных связей и реализация системных эффектов;
- реализация проектов по экспорту электроэнергии.

Рис. 5 Схема преобразователя напряжения



Однако надежность работы энергосистем определяется балансами АМ и РМ в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах. Переход из одного состояния в другое требует применения для соблюдения указанных балансов в темпе процессов быстродействующих устройств, которые могут быть созданы только на основе силовой электроники.

Усовершенствованная полупроводниковая технология открыла в начале 90-х годов прошлого века путь к изготовлению запираемых (GTO и GCT) тиристоров, мощных транзисторов (IGBT) и быстродействующих диодов, шкала параметров которых охватывает напряжения от 2500 до 6000 В, а отключаемые токи от 1500 до 4000 А. Новая элементная база дала возможность приступить к созданию нового класса преобразователей – преобразователей напряжения и различных статических устройств на их основе (СТАТКОМ, параллельно-последовательный регулятор мощности, линии и вставки постоянного тока с новыми качествами, сеть постоянно-переменного тока, широкополосные активные и гибридные фильтры, фликер-компенсаторы и др.).

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПЯЖЕНИЯ

Однофазная схема преобразователя напряжения (ПН) приведена на рис. 5а. Преобразователь состоит из шести плеч, включающих в себя встречно-параллельные запираемые тиристоры ЗТ и обратные диоды ОД. Система управления обеспечивает длительность проводящего состояния каждого плеча, равную 180° (оси 1, 2, 3 рис. 5б). Импульсы управления поступают на запираемые

Таблица 1. Результаты расчетов максимальных активных передаваемых мощностей и диапазона их регулирования

Тип линии	Значения активной передаваемой мощности P_{max} (числитель) и диапазона ее регулирования ΔP (знаменатель) при различных значениях угла передачи δ			
	0°	30°	60°	90°
Неуправляемая	0 / 0	0,5 / 0	0,866 / 0	1,0 / 0
Управляемая с ФПУ	0,454 / 0,908	0,839 / 0,787	0,999 / 0,454	1,0 / 0,109
Управляемая с УПК	0 / 0	0,75 / 0,25	1,299 / 0,433	1,5 / 0,5
Управляемая с ППРМ	0,5 / 1,0	1,0 / 1,0	1,366 / 1,0	1,5 / 1,0

тиристоры ЗТ через 60° с очередностью 1–2–3–4–5–6. При таком управлении на зажимах А, В и С ПН формируются напряжения в виде прямоугольников U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} (оси 4, 5, 6), первые гармоники фазных напряжений которых равны:

$$U_A = U_B = U_C = U_n = \frac{2}{\pi} \cdot U_d,$$

где U_d – напряжение источника постоянной ЭДС;

U_n – напряжение преобразователя.

При параллельном подключении ПН через трансформатор T_1 к шинам подстанции характеристики преобразователя можно определить по эквивалентной схеме (рис. 5в). Изменяя угол управления запираемых тиристоров и тем самым фазовое положение вектора U_n по отношению к вектору сети U_1 , а также значение U_n за счет регулирования U_d , получаем выпрямительный (рис. 5г), инверторный (рис. 5д) и компенсаторный (рис. 5е) режимы работы преобразователя. При этом энергетические характеристики ПН определяются как:

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{U_1 \cdot U_n}{X_\phi} \sin\beta; \\ Q &= \frac{U_1(U_1 - U_n \cdot \cos\beta)}{X_\phi}; \\ I_d &= -\frac{3}{\pi} \cdot \frac{U_1}{X_\phi} \sin\beta, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где X_ϕ – фазное сопротивление ПН.

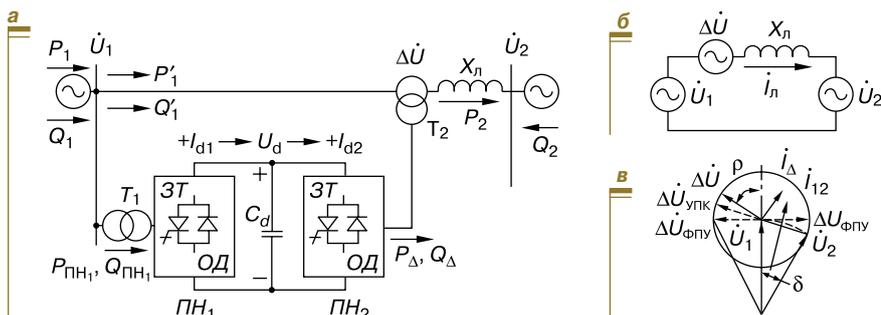
Откуда следует, что с помощью U_d и угла β вместе с изменением передаваемой через преобразователь АМ можно регулировать РМ на его входе в диапазоне как генерации, так и потребления.

Рассмотрение векторных диаграмм на рис. 5 показывает, что ПН можно представить в виде статического аналога синхронной машины, в которой регулируемое напряжение U_d источника постоянного тока – эквивалент напряжения (тока) ротора, полупроводниковый коммутатор – эквивалент статора, а угол управления – регулятор энергоносителя (вода, пар, газ) турбины или нагрузки насоса. При этом статическая синхронная машина охватывает все четыре квадрата режимов работы: генератор, двигатель с генерацией и потреблением РМ, что соответствует режимам преобразователя: инвертор, выпрямитель с генерацией и потреблением РМ.

Кроме того, полупроводниковый коммутатор осуществляет переключение фазных ЭДС шесть раз в течение периода промышленной частоты, оставляя неизменной за промежуток 60 эл. град. схему замещения (рис. 5ж). Объединение двух фаз позволяет, в отличие от традиционного СТК, осуществлять межфазовый обмен РМ, что снижает установленную мощность реакторного (до 15–20%) и конденсаторного оборудования (до 10% от мощности установки).

Рассмотренный ПН используется как базовый модуль при создании гибких линий электропередачи (ГЛЭП). Поскольку стоимость преобразовательного оборудования ГЛЭП составляет 10–30% стоимости оборудования передач и вставок постоянного тока, идея гибкого управления ЛЭП становится привлекательной и с экономических позиций. Рассмотрим конкретные примеры построения и применения технических средств для ГЛЭП.

Рис. 6. Схема ППРМ



ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ СТАТИЧЕСКИЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ (СТАТКОМ)

Как следует из анализа работы ПН, режим работы компенсатора определяется углом управления $\beta = 0$ (рис. 5е). При этом $P_{\text{ПН}} = 0$, а

$$Q_{\text{ПН}} = \frac{U_1(U_1 - U_n)}{X_\Phi},$$

т.е. значение и знак РМ зависит от разности напряжений сети и преобразователя, которая регулируется напряжением U_d . В реальных схемах СТАТКОМА в качестве источника постоянного напряжения U_d (рис. 5а) используется конденсаторная батарея C_d , напряжение на которой изменяется кратковременным переводом ПН в выпрямительный или инверторный режим. Вследствие этого в токе I_d появляется постоянная составляющая, заряжающая или разряжающая емкость батареи.

Воздействовать на первую гармонику напряжения преобразователя можно с помощью ШИМ, а также комбинаций степени модуляции с одновременным изменением U_d . Кроме того, для снижения высших гармоник тока, в отличие от показанной на рис. 1 двухуровневой схемы, используются трех- и более уровневые схемы. В начале 80-х годов в МОНИИПТ и ВНИИЭ была разработана научно-методическая основа расчетов параметров элементов СТАТКОМА, а также создан экспериментальный образец мощностью 1,7 Мвар на напряжение 10 кВ. Проведенные исследования подтвердили высокие эффективность и быстрдействие данного преобразователя при его использовании в качестве компенсатора РМ. Работы в этом направлении проводятся в США, Японии, Швеции и др. странах.

На фото 1 приведена фотография СТАТКОМА мощностью 50 Мвар и напряжением 15,75 кВ, разработанного ВНИИЭ для замены синхронного компенсатора на ПС Выборгская.

ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР МОЩНОСТИ (ППРМ)

Следующий пример применения ПН, два комплекта которых объединяются параллельно на стороне постоянного напряжения, показан на рис. 6а. При этом ПН₁ подключается к линии (шинам ПС) параллельно, а выходное переменное напряжение ПН₂ через трансформатор T_2 включается последовательно в линию, образуя дополнительный последовательный вектор напряжения $\Delta \dot{U}$, величина и фаза ρ которого изменяются с помощью систем управления ПН₁ и ПН₂ в широких диапазонах: $\Delta U = 0 \div (\pm \Delta U_{\text{зад}})$, $\rho = 0 \div 360^\circ$ по отношению к синхронизирующему напряжению U_1 (рис. 6б). Образованная ПН₁ и ПН₂ ВПТ (вставка постоянного тока) пониженной (по сравнению с передаваемой по ЛЭП) мощности может управлять режимами работы ЛЭП. Из рассмотрения эквивалентной схемы рис. 6б можно получить следующие выражения для АМ и РМ в долях базисной мощности $S_{\text{баз}} = U_1 U_2 / X_\Pi$:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_2 = \sin \delta + \Delta U^* \sin(\delta + \rho); \\ Q_1 &= (1 - \cos \delta) + \Delta U^* \cos \rho; \\ Q_2 &= (1 - \cos \delta) - \Delta U^* \cos(\delta + \rho); \\ P_\Delta &= 2\Delta U^* \sin \delta / 2 \cdot \cos(\delta / 2 + \rho); \\ Q_\Delta &= (\Delta U^*)^2 + 2\Delta U^* \sin \delta / 2 \cdot \sin(\delta / 2 + \rho). \end{aligned} \right\} (5)$$

Из анализа рис. 6в следует, что частными случаями общего режима работы являются:

Фото 1. СТАТКОМ мощностью 50 Мвар



- режим работы известного ФПУ, когда вектор $\Delta \dot{U}_{\text{ФПУ}}$ перпендикулярен вектору \dot{U}_1 ($\rho = 90^\circ$);
- режим работы регулируемого устройства продольной компенсации линии (УПК), когда вектор $\Delta \dot{U}_{\text{УПК}}$ совпадает по фазе с вектором \dot{U}_{12} , что соответствует углу $\rho = 90^\circ - \delta/2$. При этом $P_{\text{ПН}} = 0$ и наличия ПН₁ не требуется.

В табл. 1 с использованием (5) приведены результаты расчетов максимальных активных передаваемых мощностей ($P_{\text{макс}}$) и диапазона их регулирования (ΔP) для режимов работы ФПУ, УПК и ППРМ.

Данные табл. 1 показывают, что наиболее эффективным средством регулирования перетока АМ по ЛЭП является ППРМ как по передаваемой мощности, так и по диапазону ее регулирования.

Впервые проект такого регулятора мощностью 160 Мвар реализован на линии 138 кВ в штате Кентукки, США, для увеличения пропускной способности существующей ЛЭП и установления перетока мощности, указанного в соглашении о покупке-продаже электроэнергии.

Предварительные исследования эффективности рассматриваемых управляемых устройств показывают, что переход от поперечного (параллельного) к продольному (последовательному) регулированию усиливает управляемость ЛЭП по АМ и улучшает динамическую устойчивость передачи. Наибольшими техническими возможностями обладает параллельно-последовательный регулятор мощности, объединяющий функции продольного, поперечного и фазового управления и воздействующий на U , X_Π и δ одновременно.

СЕТЬ ПОСТОЯННО-ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

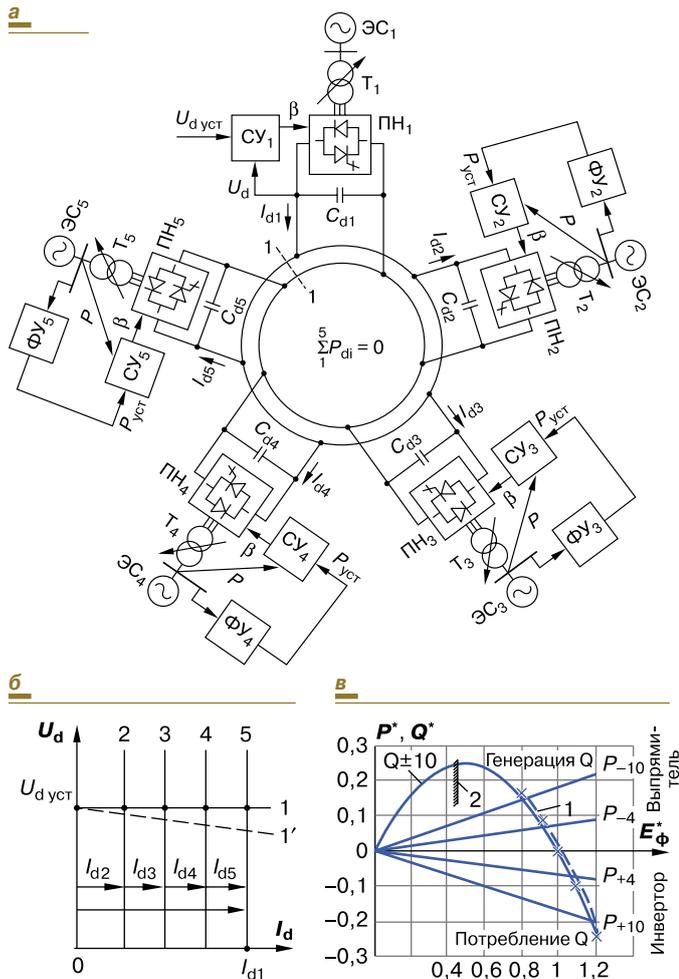
В настоящее время рассматриваются международные проекты объединения энергосистем заинтересованных стран, что позволит наиболее экономично реализовать избытки электроэнергии каждого участника объединения, а также осуществлять взаимную помощь при внештатных ситуациях, например, в послеаварийных режимах работы отдельных энергосистем.

В частности, обсуждаются вопросы создания передающей системы Восток-Запад в Европе и энергетических колец стран Черноморского региона (Черноморское кольцо), Балтийского региона (Балтийское кольцо) и др. В качестве варианта объединения предлагаются многоподстанционные системы постоянного тока (МСПТ). На наш взгляд, проблема создания МСПТ существенно упрощается при использовании в качестве выпрямительно-инверторного устройства рассматриваемого преобразователя напряжения. Как показано выше, ПН по своей физической сути является источником ЭДС переменного тока и легко вписывается в общую структуру построения энергосистем переменного тока, в которых в качестве ЭДС используются синхронные генераторы. Другими словами, речь идет о создании сети постоянно-переменного тока.

Учитывая рассмотренные режимы работы ПН (рис. 5), представим на рис. 3 сеть постоянно-переменного тока, кольцо постоянного тока которой с напряжением $\pm U_d$ охватывает n (в данном примере $n = 5$) независимых энергосистем. Разрыв по сечению 1–1 отражает радиальную ППТ с отборами мощности.

Преобразователь ПН₁ является ведущим, осуществляющим передачу мощности от крупной энергосистемы ЭС, и работающим в выпрямительном режиме. Для простоты рассмотрения считаем, что другие

Рис. 7. Сеть постоянно-переменного тока



преобразователи (ПН₂–ПН₅) работают в инверторном режиме, передавая АМ в свои местные энергосистемы ЭС₂–ЭС₅. Очевидно, что:

$$P_{d1} = \sum_{i=2}^5 P_{di} \text{ или } \sum_{i=2}^5 P_{di} = 0. \tag{6}$$

На ПН₁ возлагается функция регулирования и стабилизации постоянного напряжения U_d . При этом внешняя характеристика ПН₁ представляется на рис. 7б прямой 1, параллельной оси I_d . Внешние характеристики других преобразователей при отсутствии в них регулирующих устройств отображаются прямыми 2–5. Пересечения внешних характеристик выпрямителя и инверторов определяют устойчивые режимы работы каждого преобразователя, а сумма токов и мощностей при $U_d = \text{const}$ соответствует выражению (6). При изменении угла управления любого инверторного преобразователя изменяется его ток и мощность, что приведет к соответствующему изменению мощности ведущего преобразователя ПН₁, т.к. нарушение баланса АМ приведет к изменению U_d , а его восстановление

произойдет за счет изменения мощности ПН₁. Поведение преобразователей при $U_d = \text{const}$ по АМ и РМ характеризуется графическими зависимостями на рис. 7в, анализ которых показывает:

- линейное изменение активной мощности ПН при $\beta = \text{const}$; при этом незначительный диапазон углов управления ($0 \div 10^\circ$) существенным образом влияет на передаваемую в энергосистему АМ;
- согласованное изменение РМ преобразователя при колебаниях напряжения сети (генерация Q при снижении напряжения ниже номинального значения, и потребление Q при увеличении напряжения выше номинального значения);
- незначительные отклонения кривых зависимостей РМ в реальном диапазоне углов управления ПН ($0 \div 10^\circ$).

Преобразователи ПН₂–ПН₅ управляются по критерию $P = \text{const}$ (или $I_d = \text{const}$ при $U_d = \text{const}$). Уставка АМ $P_{уст}$ задается формирователем уставки (ФУ) – диспетчером местной энергосистемы централизованно или автоматическим регулятором частоты.

Введение ШИМ в систему управления позволяет разделить регулирование АМ и РМ при постоянстве U_d по алгоритмам:

$$P = P_d = I_d \cdot U_d = -\frac{3}{\pi} \frac{U_1 U_d}{X_\phi} \sin\beta; Q = \frac{U_1(U_1 - K_m \cdot U_d \cos\beta)}{X_\phi}, \tag{7}$$

где $U_n = K_m \cdot U_d$;

K_m – коэффициент модуляции.

Получаем зависимость АМ от угла управления β , а РМ при заданном β – от коэффициента модуляции.

Таким образом, рассматриваемая система постоянно-переменного тока позволяет объединить значительное количество энергосистем, при этом обеспечивая устойчивость режимов средствами управления и регулирования по локальным параметрам.

Отметим, что переход ПН из выпрямительного в инверторный режим и обратно сопровождается изменением полярности тока, а не напряжения, как в традиционных преобразователях тока. Поэтому принципиально преобразователи (ПН₂–ПН₅) могут работать в любом режиме в зависимости от энергетического состояния своей энергосистемы.

Имеющийся избыток АМ может передаваться в кольцо постоянного тока, а при недостатке забираться из него. Тем самым в каждой местной энергосистеме будет поддерживаться заданная частота за счет баланса АМ, а за счет необходимой характеристики РМ преобразователей – и уровни напряжений. Безусловно, что режим работы ведущего преобразователя ПН₁ в общем случае зависит от режимов работы всех остальных. Если один из ПН₂–ПН₅ перейдет в выпрямительный режим, то ПН₁, стабилизируя U_d в кольце, снизит свою АМ, восстанавливая $\sum P_{di} = 0$. В зависимости от энергетических условий роль ведущего преобразователя может выполнить любой ПН за счет изменения структуры системы регулирования.

Вставка постоянного тока является частным случаем рассмотренной выше многоподстанционной системы постоянного тока и состоит из двух преобразователей напряжения или двух СТАТКОМов, объединенных по цепи постоянного тока. К сети переменного тока преобразователи подключены параллельно.

ВЫВОД

Применение преобразователя напряжения в качестве управляемого элемента электрических сетей переменного тока, передач и вставок постоянного тока и комбинированных систем постоянно-переменного тока открывает новые технологические возможности ведения режимов энергосистем по активной и реактивной мощности.