



НОВОСТИ Электротехники

ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Поиск

[Очередной номер](#)

[Архив](#)

[Вопрос-ответ](#)

[Гостевая книга](#)

[Подписка](#)

[О журнале](#)

[Нормы. Стандарты](#)

[Проекты. Методики](#)

[Форум](#)

[Выставки](#)

[приложение
Вопрос • Ответ](#)

[< Предыдущая](#)] [[Следующая >](#)

Журнал №1(31) 2005

Технологические процессы любого производства в значительной мере зависят от качества электроэнергии. В общем случае низкое качество электроэнергии может быть охарактеризовано как любые изменения в энергоснабжении, приводящие к нарушениям нормального хода производственного процесса или к повреждению оборудования, трансформаторов, электродвигателей.

От чего зависит качество электроэнергии при ее передаче и распределении, какие современные способы его повышения распространены в мире, на каких технологиях и принципах они базируются – об этом в материале одного из ведущих французских специалистов в области силовой электроники Жака Куро.



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ЕЕ ПЕРЕДАЧЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИИ

Жак КУРО, технический директор сектора силовой электроники компании AREVA T&D, Франция

Основой достижения высокого качества электроэнергии, с целью улучшения условий жизни населения и повышения эффективности производства являются три составляющие: производство электроэнергии высокого качества, бесперебойная передача и распределение по надежным сетям. В настоящей статье рассматриваются только передача и распределение, так как перечисленные моменты проявляют растущую тенденцию к взаимопроникновению из-за развития децентрализованного производства электроэнергии. Мы остановимся на вопросах качества напряжения. Конечно, в таком виде описание будет неполным, поскольку бесперебойность электроснабжения также является одним из основных параметров общей концепции качества электроэнергии. Но это тема, заслуживающая отдельного разговора.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ВОЗМУЩЕНИЙ

Возмущения, снижающие качество напряжения, могут возникать как при передаче, так и при распределении электроэнергии.

Возмущения при передаче

Из-за значительной протяженности воздушные линии электропередачи подвержены воздействию атмосферных явлений. Различные виды разрядов атмосферного электричества (молний) являются причинами различных типов возмущений, бросков, посадок сетевого напряжения, полного прекращения подачи электроэнергии.

Длительность и степень возмущений зависят от структуры сети и времени, необходимого на ее реконфигурацию. Причины возникновения перенапряжений из-за ударов молний обычно рассматриваются как внешние по отношению к сети.

Другие виды возмущений возникают в процессе управления сетью, при сбросах или неожиданных нарастаниях нагрузки. Хотя последний вид возмущений достаточно редок, поскольку обычно крупные нагрузки подключаются к сети постепенно. Это не относится к внезапным сбросам нагрузки, которые зачастую являются следствием аварий.

Внутрисетевые источники возмущений:

- Резонанс. Сюда относятся характерные для данной сети колебания или колебания, возникающие между различными элементами сети, например, фильтрами. Разумеется, для их предотвращения принимаются все возможные меры, но они могут временно возникать при изменениях конфигурации сети.
- Неустойчивость при передаче. Наиболее часто она связана с углом передачи d (или внутренним углом, или транспортным углом). Возможно также возникновение подсинхронных колебаний, что может оказать катастрофическое воздействие на силовые генераторы электростанций.
- Феррорезонанс. Нелинейные колебания, возникающие при насыщении силовых или измерительных трансформаторов.
- Коммутации. Перенапряжения возникают вследствие подключения или отключения элементов сети, фильтров, конденсаторных батарей или трансформаторов.
- Повреждения «фаза/земля».

Возмущения при распределении

Сейчас мы имеем дело со всё возрастающим количеством электрических нагрузок, ухудшающих качество энергии в сети как на бытовом, так и на промышленном уровне, и с активной деятельностью по стандартизации качества энергии. Последняя тенденция весьма не-однозначна, так как на начальном этапе она приводит к штрафным санкциям по отношению к производителям и даже к потребителям, в то время как организации, занятые распределением энергии, как правило, не несут никакой ответственности в отношении мощности короткого замыкания или структуры полного сопротивления сети. Силовая электроника вызывает ухудшение качества энергии, но по сравнению с другими видами преобразования она характеризуется наличием собственных средств борьбы с этим ухудшением.

В течение многих лет пассивные фильтры использовались в связке с высокомоощными тиристорными или диодными преобразователями.

Сейчас на рынке появились запираемые электронные элементы – IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором), GTO (запираемый тиристор) или IGCT (запираемый тиристор с интегрированным блоком управления), которые сделали возможным производство преобразователей, способных повышать качество энергии. Стали реальностью активные фильтры для низких напряжений, доказана возможность их применения на средних напряжениях, и эта технология в ближайшие годы будет активно развиваться.

Ухудшение качества электроэнергии не сводится только к гармоникам. Сюда же входят изменения напряжения, посадки напряжения и возмущения, связанные с колебаниями напряжения, называемые «мерцанием» или «фликкер-эффектом», с частотой от 1 до 30 Гц и максимумом возмущений при частоте 9 Гц. Электроника больших мощностей в состоянии предложить решения по борьбе с последними тремя видами возмущений.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ

Коротко говоря, при передаче энергии возникают три основные проблемы:

- устойчивость передачи, в значительной степени связанная с величиной транспортного угла;
- контроль напряжения и рост напряжения при отсутствии нагрузки;
- подсинхронный резонанс, который может привести к выходу из строя генераторных установок электростанций.

Строительство новых линий электропередачи связано со значительными затратами и часто попросту невозможно по причинам экологического характера. Поэтому приходится увеличивать мощность энергии, передаваемой по существующим линиям, в основном за счет увеличения силы тока. Это достижимо только при следующих условиях:

- отсутствие тепловых ограничений;
- наличие надежного управления распределением потоков энергии между линиями, питающими определенную местность.

При соблюдении этих условий можно производить повышение передаваемой мощности в режиме максимальной надежности, оставаясь в пределах допустимой устойчивости, т.е. при значениях транспортного угла, не превышающих 40°. Для управления величиной транспортного угла используются различные устройства, например, поперечные (шунтирующие) компенсаторы и продольные компенсаторы.

Продольная компенсация

Линии высокого напряжения имеют индуктивное сопротивление, и чем выше падение напряжения на нем, тем выше транспортный угол. Идея увеличения передаваемой мощности проста. Величина индуктивного сопротивления должна компенсироваться последовательно включенной емкостью. В настоящее время используется несколько конструктивных решений.

Конденсатор постоянной емкости (рис. 1)

Рис. 1

Конденсатор постоянной емкости

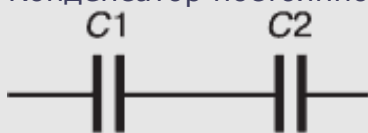


Рис. 2

Конденсаторная батарея с тиристорным переключением

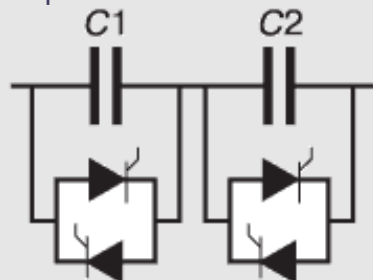
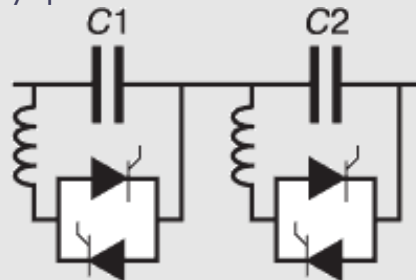


Рис. 3

Конденсаторная батарея с тиристорным управлением



Степень компенсации постоянна. Этот принцип позволяет повышать передаваемую по линии мощность, пока не будут достигнуты ограничения по тепловыделению. Такие системы не способны подавлять появление подсинхронных колебаний генераторов электростанций, наоборот, при таком способе компенсации могут создаваться условия, благоприятные для их возникновения.

Конденсаторная батарея с тиристорным переключением (рис. 2)

Степень компенсации изменяется ступенчато. Все замечания к решению на рис. 1 остаются справедливыми и для этого решения.

Конденсаторная батарея с тиристорным управлением (рис. 3)

Степень компенсации регулируется практически в любых пределах. Это решение также позволяет управлять стабильностью передачи и подавлять возникновение подсинхронных колебаний. Тиристоры работают в режиме подстройки фазы. Модуль TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor – конденсаторная батарея с тиристорным управлением) в процессе работы представляет собой либо конденсатор переменной емкости, либо дроссель переменной индуктивности. Однако переключение из режима емкости в режим индуктивности и обратно невозможно без промежуточного отключения из-за резонансных явлений.

Модули TCSC обычно обладают достаточной динамикой для подавления подсинхронных колебаний.

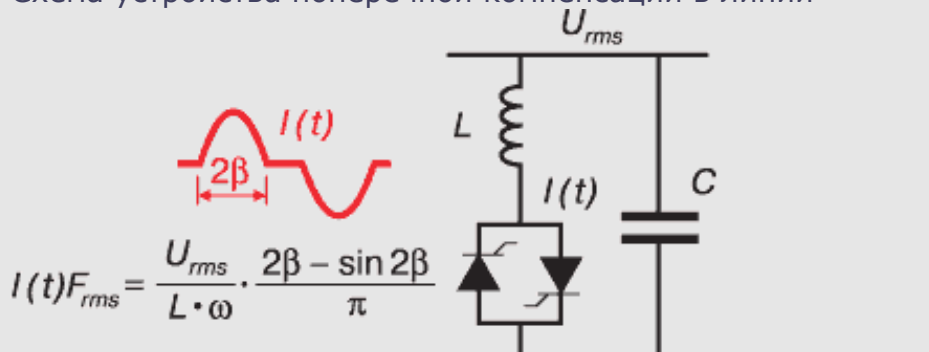
Поперечная компенсация

Устройство, включенное в среднюю точку линии и способное поглощать и возвращать реактивную мощность, обеспечивает постоянство напряжения в этой точке. При этом транспортный угол снижается вдвое и соответственно может быть увеличена передаваемая мощность.

Такие устройства были разработаны более 30 лет назад. Решение состоит в подключении к линии емкости, а параллельно ей – регулируемого устройства, способного компенсировать избыточную реактивную мощность для поддержания постоянного значения напряжения в точке подключения (рис. 4).

Рис. 4

Схема устройства поперечной компенсации в линии



$I(t)_{F_{rms}}$ – действующее значение тока;

U_{rms} – действующее значение напряжения;

L – индуктивность реактора;

C – емкость батареи конденсаторов;

ω – угловая частота;

β – угол пропускания тока;

Q_C – мощность конденсаторной батареи;

Q_L – мощность реактора;

Q_{SVC} – мощность статического тиристорного компенсатора

$$Q_C = U_{rms}^2 \cdot C \cdot \omega$$

$$Q_L = U_{rms} \cdot I_{F_{rms}}$$

$$Q_{SVC} = Q_C - Q_L$$

Рис. 5

Схема установки SVC
TCR и TSC

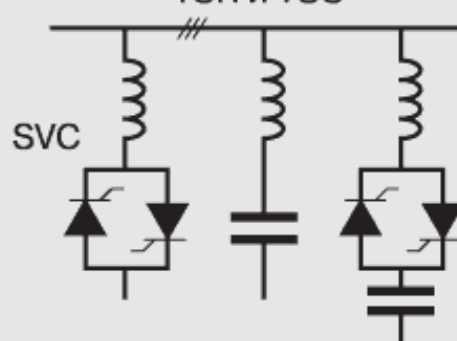
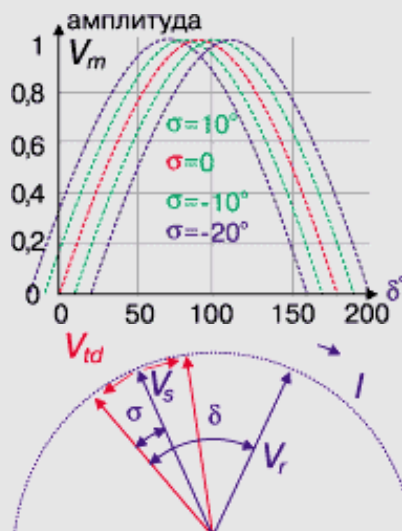
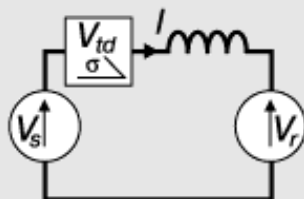


Рис. 6

Зависимость мощности от угла δ

V_s – напряжение источника;
 V_r – напряжение приемника;
 X – реактор, имеющий чисто индуктивное сопротивление



Индуктивность изменяется за счет использования тиристорov. Такие системы называются SVC (Static VAR Compensator) – ССКРМ (система статической компенсации реактивной мощности).

Статический контактор, управляющий силой тока в реакторе, генерирует в сети гармоники. Это послужило первой причиной для организации емкостей в систему фильтров. Существуют и другие причины, связанные со структурой сети, в основном с возникновением параллельного резонанса, из-за наличия емкостей в установке SVC. В общем виде схема установки SVC показана на рис. 5. В нее входят цепь управления реактором TCR (Thyristor Controlled Reactor – реактор с тиристорным управлением) и цепь ступенчатого подключения элементов конденсаторной батареи TSC (Thyristor Switched Capacitor – конденсаторная батарея с тиристорным переключением).

По причинам экономического характера часто бывает затруднительно установить фиксированную значительную емкость. Это потребует также установки модуля TCR большой мощности. Поэтому используют несколько конденсаторных батарей. TSC могут подключаться или отключаться по отдельности, а TCR значительно меньшей мощности обладает функцией «верньера» для обеспечения постоянного управления реактивной мощностью.

Необходимо отметить, что сетевые SVC обычно обладают достаточной динамикой для того, чтобы подавлять возникновение подсинхронных колебаний. Когда в сети отсутствует нагрузка, из-за распределенной емкости линии происходит рост напряжения. Для его ограничения необходимо осуществлять поглощение реактивной мощности. Именно поэтому установки SVC часто проектируются с учетом необходимости служить и поглотительными устройствами.

Фазосдвигающий трансформатор

Угол δ (между напряжениями) является важнейшим параметром регулирования мощности (рис. 6).

Фазосдвигающие трансформаторы используются начиная с 80-х годов для управления энергопотоками в сетях. В связи с сокращением государственного вмешательства в управление энергосетями, с развитием торговли электроэнергией и связей между энергосистемами различных стран, в настоящее время задача управления энергопотоками становится особенно актуальной.

Зависимость величины передаваемой мощности P от угла сдвига фаз, обеспечиваемого фазосдвигающим трансформатором, выражается следующим образом:

$$P = V^2/X \cdot \sin (\delta - \sigma) .$$

Регулирование угла сдвига фаз позволяет управлять активной мощностью. При

дальнейшем усложнении технологии возможно регулирование и амплитуды, что позволяет управлять реактивной мощностью. На рис. 7 показана схема фазосдвигающего трансформатора.

Рис. 7
Схема фазосдвигающего трансформатора

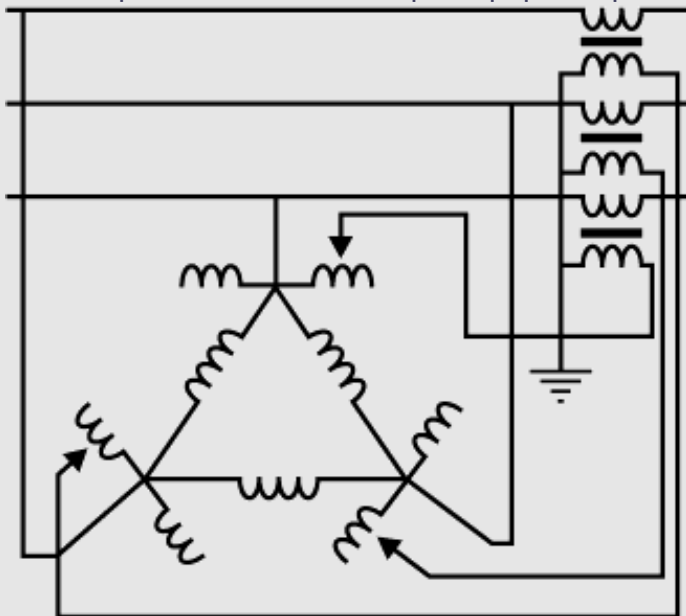
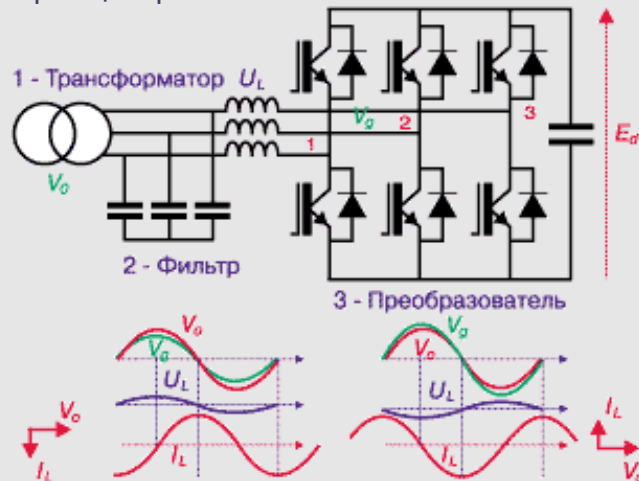


Рис. 8
Принцип работы FACTS



Современные FACTS
(Гибкие системы передачи энергии переменного тока)

Системы FACTS появились около 15 лет назад. Предпосылками их разработки послужило появление на рынке запираемых электронных компонентов высокой мощности – IGBT, GTO, IEGT. До сих пор широко применяются классические системы FACTS, основанные на использовании тиристоров (управление по току). Современные системы FACTS используют компоненты, которые могут управляться командами по напряжению. Важнейшее свойство FACTS – их способность поглощать или возвращать реактивную мощность – показано на рис. 8.

На рисунке V_0 – напряжение вторичной обмотки трансформатора,

V_g – основная гармоника напряжения на выходе

преобразователя. Преобразователь управляется в режиме PWM (Pulse Width Modulation – широтно-импульсной модуляции – ШИМ). Это оправдывает наличие фильтра между преобразователем и сетью.

Напряжение сети V_0 и напряжение на выходе преобразователя

находятся в фазе. Возникновение любого различия между этими напряжениями вызывает падение напряжения на соответствующем реакторе продольной компенсации, также совпадающее по фазе с напряжением сети (U_L). Знак этого напряжения соответствует знаку разности $V_0 - V_g$.

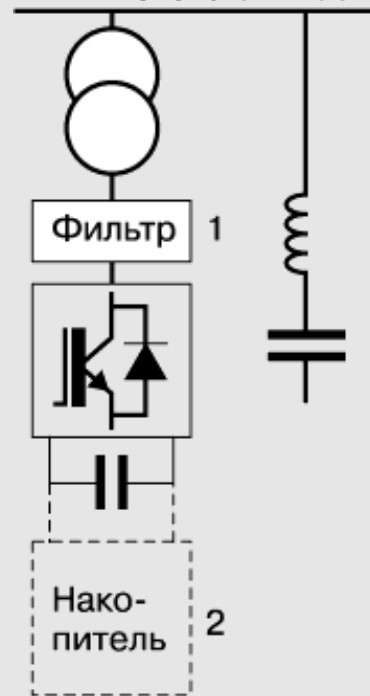
Результирующий ток I_L имеет сдвиг относительно этого напряжения на 90° .

При $V_g < V_0$ система работает в индуктивном режиме, при $V_g > V_0$ – в емкостном.

В соответствии с описанной структурой разрабатывались и уже применяются современные устройства продольной и поперечной компенсации.

Рис. 9

Схема STATCOM



Поперечная компенсация – STATCOM

(STATic synchronous COMpensator – Статический синхронный компенсатор) Хотя компенсаторы STATCOM (рис. 9) способны поглощать и возвращать реактивную мощность Q , их применение обычно ограничивается статической компенсацией по причинам экономического характера.

Обычно $Q_{\max} = Q_F + Q_{\text{STATCOM}}$ и $Q_{\min} = Q_F - Q_{\text{STATCOM}}$, причем Q_{STATCOM} несколько выше величины Q_F , чтобы обеспечить возможность поглощения реактивной мощности при отсутствии нагрузки в сети.

Когда напряжение в точке подключения остается постоянным, компенсатор STATCOM ведет себя как компенсатор SVC. Однако в режиме ограничения мощности компенсатор STATCOM становится источником тока, тогда как компенсатор SVC приобретает свойства конденсатора. Компенсаторы STATCOM могут также вести себя как активные фильтры. Разумеется, за дополнительную функциональность компенсаторов STATCOM приходится и дополнительно платить.

Среди множества функций этих компенсаторов классическими являются следующие:

- регулирование напряжения путем поглощения или возврата реактивной мощности;
- подавление подсинхронных колебаний.

При снижении напряжения SVC ведет себя как конденсатор, и реактивная мощность падает пропорционально квадрату напряжения. Система STATCOM в такой же ситуации переходит в режим постоянного источника тока. Напряжение на выводах конденсатора может поддерживаться постоянным.

Продольная компенсация – SSSC

(Static Synchronous Series Compensator – Статический синхронный продольный компенсатор)

В этих системах удается исключить недостаток систем TCSC (конденсаторная батарея с тиристорным управлением), состоящий в невозможности плавного перехода от емкостного режима к индуктивному.

SSSC (рис. 10) может возвращать только реактивную мощность, за исключением случаев, когда контур постоянного тока получает подпитку от накопителя энергии.

В распределении энергии используется этот же принцип, который получил название DVR (Dynamic Voltage Restorer – система динамического восстановления напряжения), хотя по функциональности они несколько отличаются. Здесь целью является поддержка сети в отношении ее наиболее уязвимых потребителей при кратковременных возмущениях. Мощность имеющихся на рынке установок DVR не превышает 1 МВА.

Рис. 10

Схема SSSC

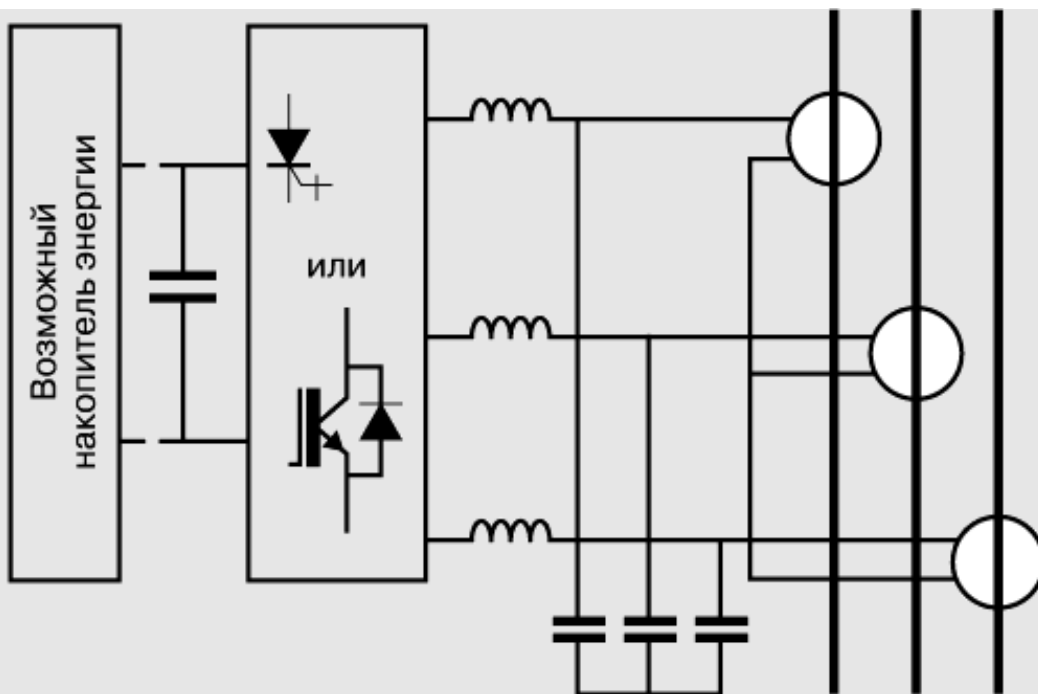
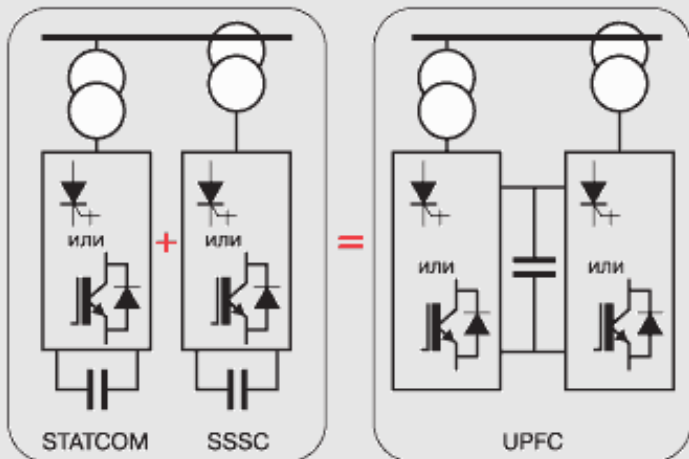


Рис. 11
Схема UPFC



Универсальная компенсация – UPFC

(Unified Power Flow Controller – Унифицированная система управления энергопотоками)

Мощности систем STATCOM и других типов SSSC настолько высоки, что использование их без применения накопителей энергии достаточной емкости затруднительно. Если такая возможность отсутствует, мы должны быть в состоянии управлять величиной транспортного угла, как в случае использования фазосдвигающего трансформатора, но со значительно более высоким быстродействием. Система UPFC воплощает эту мечту в реальность без использования какого-либо накопителя энергии. Система UPFC представляет собой не что иное, как объединение систем STATCOM и SSSC (рис. 11).

Это наиболее сложная из систем FACTS. Она позволяет осуществлять следующие функции:

- непосредственное управление напряжением. Сложение или вычитание напряжений, фазированных узлом поперечной компенсации. Эти действия производятся над реактивной мощностью;
- поперечный компенсатор – путем управления поперечным преобразователем с переводом последнего в режим поглощения или возврата реактивной мощности. Напряжение должно поддерживаться постоянным;
- продольный компенсатор: путем добавления последовательного напряжения, со

сдвигом на 90о по отношению к току связи. При этом необходимо управлять выходным напряжением и реактивной мощностью на выходе;

- фазосдвигающее устройство: если величина и фаза продольного напряжения таковы, что при поддержании такого же напряжения на выходе модуля оно уменьшает величину сдвига фаз по отношению ко входу. Это имеет важное значение при управлении передаваемой активной мощностью.

Или, наконец, одновременное использование всех функций – число степеней свободы системы позволяет это делать, – когда необходимо управлять и реактивной, и активной мощностью.

Преимущества системы UPFC очевидны. Хотя в настоящее время система не особенно распространена, в ближайшие годы эта технология будет активно развиваться, в основном в городах, где особенно сложно осуществить строительство дополнительных линий. Число систем UPFC, которые находятся в эксплуатации на сегодняшний день, можно пересчитать по пальцам одной руки. Одна система UPFC мощностью 2х160 МВА находится в эксплуатации с 1998 года в системе усиления, состоящей из двойной ЛЭП 135 кВ от АЭС в США. Она позволяет повысить передаваемую мощность на 100 МВт.

В следующем номере журнала Жак Куро остановится на проблемах распределения электроэнергии. Он рассмотрит технологии восстановления нагрузки, устранения флуктуации напряжения, способы компенсации посадок напряжения, вопросы выбора напряжения промышленной распределительной сети.

[Очередной номер](#) | [Архив](#) | [Вопрос-Ответ](#) | [Гостевая книга](#)
[Подписка](#) | [О журнале](#) | [Нормы. Стандарты](#) | [Проекты. Методики](#) | [Форум](#) | [Выставки](#)
[Тендеры](#) | [Книги, CD, сайты](#) | [Исследования рынка](#) | [Приложение Вопрос-Ответ](#) |
[Карта сайта](#)



Copyright © by news.elteh.ru

Использование материалов сайта возможно только с письменного разрешения редакции news.elteh.ru

При цитировании материалов гиперссылка на сайт с указанием автора обязательна



НОВОСТИ Электротехники

ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Поиск

[Очередной номер](#)

[Архив](#)

[Вопрос-ответ](#)

[Гостевая книга](#)

[Подписка](#)

[О журнале](#)

[Нормы. Стандарты](#)

[Проекты. Методики](#)

[Форум](#)

[Выставки](#)

[приложение
Вопрос • Ответ](#)

[< Предыдущая](#)] [[Следующая >](#)

Журнал №2(32) 2005

В прошлом номере журнала («Новости Электротехники» № 1(31) 2005) мы опубликовали первую часть материала известного французского специалиста в области силовой электроники Жака Куро, в которой он рассказал о возмущениях, возникающих при передаче и распределении электроэнергии, и способах обеспечения надежности передачи. Во второй части автор остановится на проблемах, связанных с распределением электроэнергии, а также технологиях и принципах, широко используемых в мире для повышения качества электроэнергии.



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ЕЕ ПЕРЕДАЧЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИИ

Жак КУРО, технический директор сектора силовой электроники компании AREVA T&D, Франция

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Изменения напряжения можно разделить на две группы: изменения при передаче и изменения, связанные с использованием электроэнергии. При распределении важное значение имеют два аспекта: удовлетворение требований по качеству в точке подключения и непрерывность электроснабжения, т.е. отсутствие отключений и посадок напряжения.

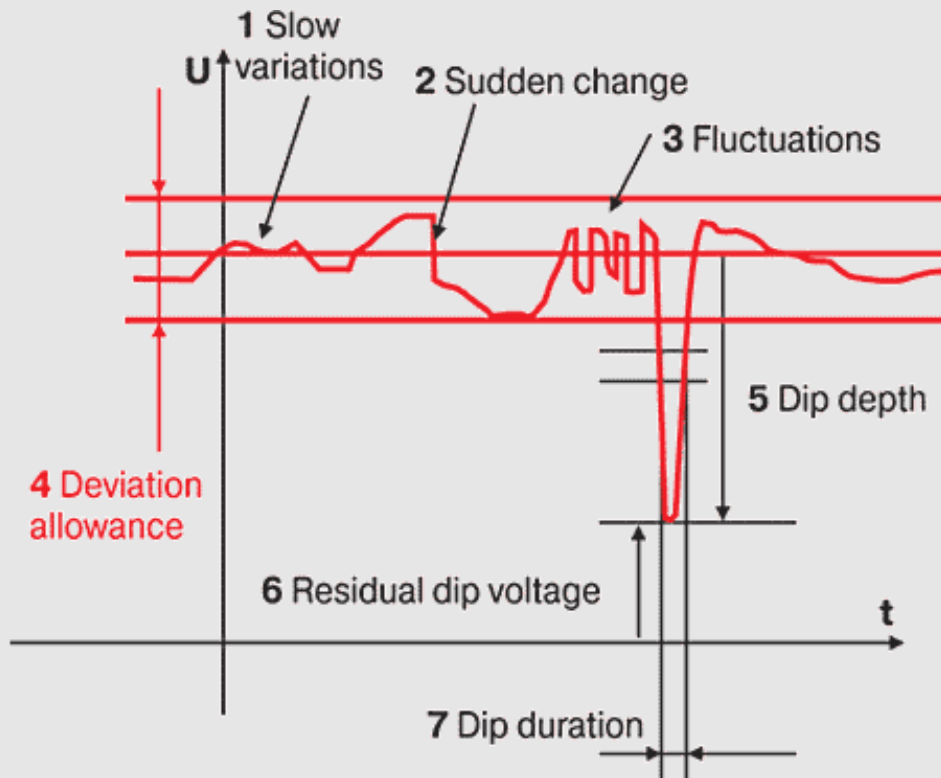
В настоящее время имеется возможность установки оборудования, которое способно предотвратить или заметно ослабить отклонения напряжения. Очевидно, что в рассматриваемых типичных случаях в качестве средства ликвидации или компенсации отклонений используют накопители энергии в какой-либо форме: реактивной, активной или одновременно обеих.

Во всех случаях мощность короткого замыкания в точке подключения нагрузки является определяющим и даже критическим фактором. Чем мощнее источник, тем меньше отклонения при передаче и влияние нагрузок (резкопеременных или мощных).

На рис. 1 мы постарались обобщить и классифицировать различные виды изменений напряжения в сети с целью выбора мер, наиболее подходящих для устранения

возмущений.

Рис. 1. Различные виды изменений напряжения в сети



- 1 Медленные изменения**
- 2 Резкое изменение (скачок)**
- 3 Флуктуации**
- 4 Допустимые изменения**
- 5 Глубина посадки**
- 6 Остаточное напряжение при посадке**
- 7 Длительность посадки**

Естественно, что принимаемое решение зависит от типа сети и вида подключенных потребителей. Если величина флуктуаций напряжения не выходит за рамки допустимых пределов, совершенно ясно, что никакой коррекции проводить не требуется. Возможны медленные изменения напряжения, выходящие за эти рамки. Это, скорее, проблема энергоснабжающей компании, чем потребителя, связанная с длиной линии, недостаточной мощностью короткого замыкания (мощностью источника). Посадки напряжения также относятся к вопросам энергоснабжающей компании и связаны с задержками в отключении коротких замыканий и отказами оборудования. Флуктуации напряжения, с другой стороны, происходят в основном из-за плохого согласования мощности источника с быстро изменяющейся в ходе производственных процессов нагрузкой у потребителей.

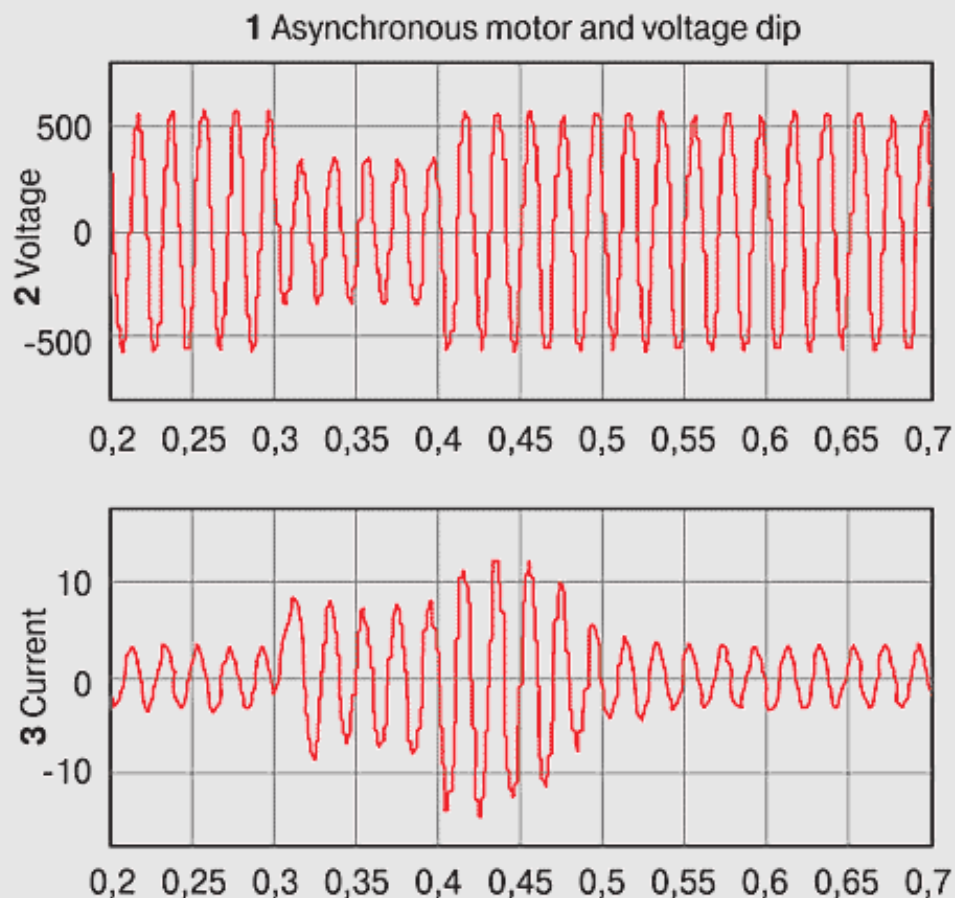
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАГРУЗКИ (САМОЗАПУСК)

Восстановление электроснабжения нагрузки (например, после АВР), более известное как самозапуск, создает значительные токи. Уровень напряжения при этом снижается, что может оказывать серьезное влияние на устойчивость работы всей сети.

При снижении напряжения некоторые потребители сохраняют уровень потребляемой

мощности, что приводит к росту потребляемого тока. Типичным примером являются асинхронные электрические машины (рис. 2). При снижении напряжения их скорость сохраняется постоянной, что приводит к росту потребляемого тока. При возвращении напряжения к нормальному значению наблюдается рост потребляемого тока за счет протекания переходных процессов.

Рис. 2. Асинхронный двигатель и посадка напряжения



1 Асинхронный двигатель и посадка напряжения

2 Напряжение

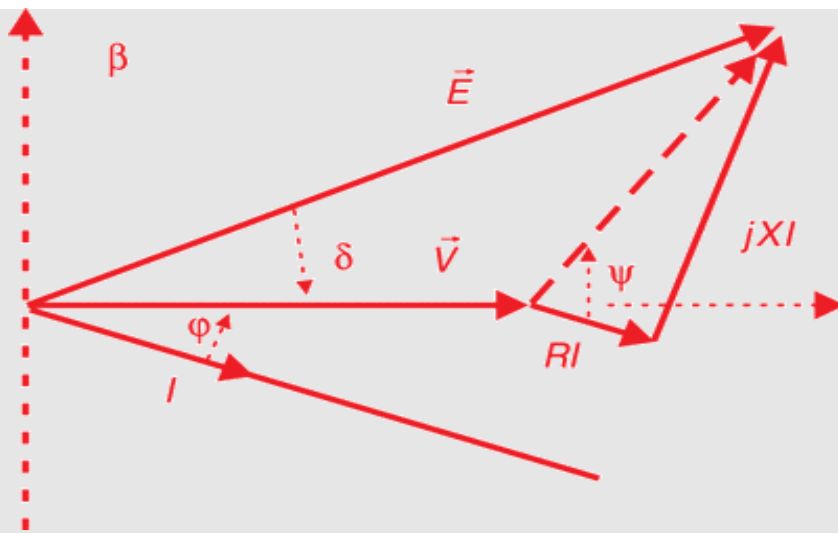
3 Ток

ОЦЕНКА ПОСАДОК НАПЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Изменения напряжения в сети происходят из-за изменений не столько активной, сколько реактивной мощности.

Приведем почти точную формулу относительного изменения напряжения (по отношению к напряжению холостого хода распределительной сети) согласно рис. 3.

Рис. 3. «Почти точная» формула расчета посадки напряжения



- E – напряжение источника;
- V – напряжение;
- ΔV – отклонение напряжения;
- SCC – мощность короткого замыкания;
- P – активная мощность;
- Q – реактивная мощность;
- $\operatorname{tg} j$ – угол между током и напряжением;
- X – индуктивное сопротивление;
- R – активное сопротивление.

$$\left| \frac{E - V}{E} \right| = \Delta V = \frac{1}{SCC} \cdot \left(Q + \frac{P}{\operatorname{tg} \psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left(P + \frac{Q}{\operatorname{tg} \psi} \right)^2$$

где

$$SCC = \frac{3 \cdot E^2}{X}$$

и

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{X}{R}$$

SCC представляет собой мощность короткого замыкания, а $\operatorname{tg} j$ обычно имеет значение в пределах от 7 до 10. На уровне распределения это в основном изменение напряжения, вызванное изменением нагрузки, которое можно оценить, используя формулы:

$$\Delta v_1 = \frac{1}{SCC} \cdot \left(Q_1 + \frac{P_1}{\operatorname{tg} \psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left(P_1 + \frac{Q_1}{\operatorname{tg} \psi} \right)^2$$

$$\Delta v_2 = \frac{1}{SCC} \cdot \left(Q_2 + \frac{P_2}{\operatorname{tg} \psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left(P_2 + \frac{Q_2}{\operatorname{tg} \psi} \right)^2$$

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} = \frac{\Delta v_1 - \Delta v_2}{1 - \Delta v_1}$$

Если SCC превышает значение выражения $Q_1 - P_1 / a \operatorname{tg} j$, можно записать:

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} \approx \frac{1}{SCC} \cdot \left(\Delta Q - \frac{\Delta P}{\operatorname{tg} \psi} \right) \approx \frac{\Delta Q}{SCC}$$

На первом этапе точность, обеспечиваемая этой формулой, часто считается удовлетворительной. С целью избежать перегрузки сетей (линий, трансформаторов, другого оборудования), которые испытывают основные нагрузки, всегда поощрялось стремление пользователей компенсировать использование реактивной мощности. В таких случаях следует устанавливать пассивное компенсирующее оборудование, состоящее в основном из конденсаторных батарей с подстроечными дросселями, иногда с демпфирующими резисторами для гашения параллельного резонанса. Начиная с 1987 г., например, потребление реактивной мощности, разрешенное EDF (Electricite de France – французской сетевой компанией), ограничено величиной

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \leq 0,4$$

Более того, EDF выставяет счета за избыточное использование реактивной мощности. В Бельгии это ограничение составляет

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \leq 0,33$$

Необходимо отметить, что фиксированная компенсация не оказывает влияния на изменения напряжения, вызванные флуктуациями реактивной мощности. Если уровень фиксированной компенсации слишком велик по отношению к минимальному расходу реактивной мощности, возникает риск избыточной компенсации, которая может привести к повышению напряжения у потребителей.

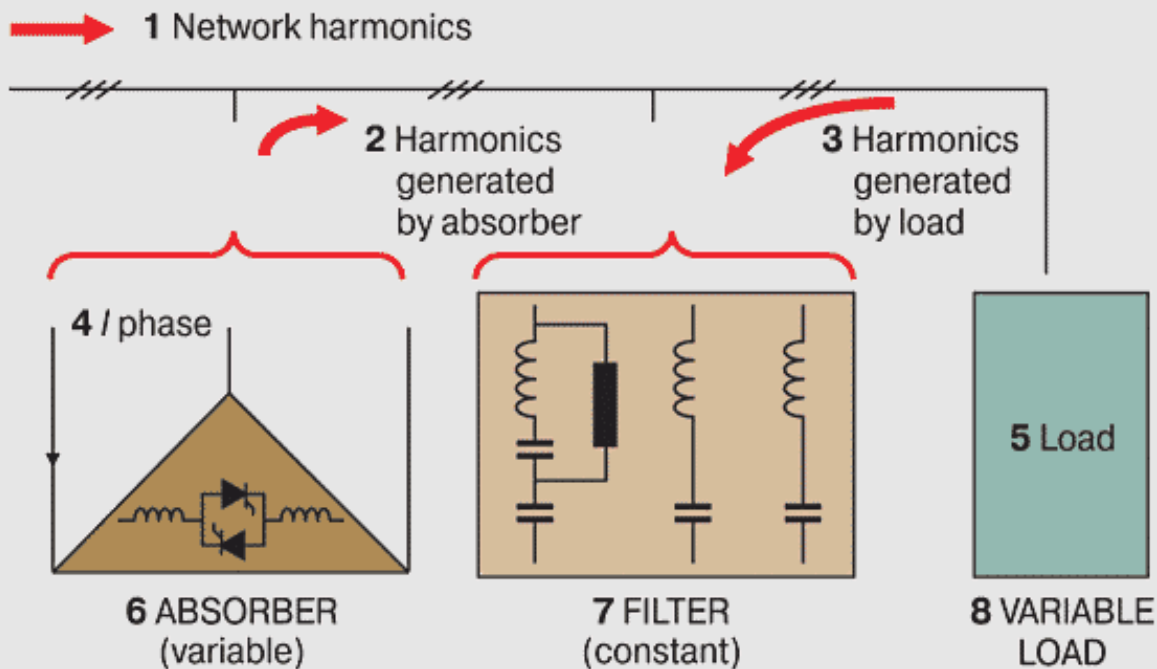
Для мало меняющихся нагрузок в прошлом часто использовались синхронные компенсаторы, синхронные электрические машины с перевозбуждением, способные генерировать реактивную мощность. С течением лет, с ростом динамики процессов и ужесточением требований к стабильности сетей, получили распространение средства статической компенсации – системы SVC и STATCOM, о которых мы рассказывали в первой части материала.

ФЛУКТУАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Для стабилизации напряжения распределительных сетей используются те же средства, что и в сетях передачи, хотя цели их применения несколько различаются. Встает вопрос об управлении напряжением и повышении коэффициента мощности. Сложности в основном возникают из-за быстро меняющихся нагрузок, таких, как прокатные станы, сварочные агрегаты и более всего дуговые печи. На рис. 4 приведен характерный пример обобщенной распределительной сети с возмущениями, которые устраняются с помощью установки SVC. На рисунке показаны конденсаторы, установленные в составе фильтров для подавления гармоник; емкость конденсаторов подобрана таким образом, чтобы

возвращать реактивную мощность, необходимую для поддержания заданного значения $\text{tg } j$; имеется также поглотитель (TCR-дроссель с тиристорным управлением), предназначенный для компенсации избыточной емкости в необходимых случаях. Ясно, что для поддержания постоянного значения напряжения в сети или хотя бы для исключения изменений, поступление реактивной мощности в распределительную сеть должно быть нулевым или постоянным.

Рис. 4. Пример обобщенной распределительной сети с возмущениями, которые устраняются с помощью установки SVC



1 Сетевые гармоника

2 Гармоника, порожденные поглотителем

3 Гармоника, порожденные нагрузкой

4 Ток фазы

5 Нагрузка

6 Поглотитель (переменный)

7 Фильтр (постоянный)

8 Переменная нагрузка

ФЛИККЕР-ЭФФЕКТ

Проблемы, вызываемые изменениями напряжения, известны под названием фликкер-эффекта (мерцания). Этот эффект определяется P_t (дозой фликкера). Следует напомнить, что P_t не является ни мгновенной, ни средней величиной. Это оценка серьезности проблем, вызываемых фликкер-эффектом, а не самого фликкер-эффекта. Необходимо отметить, что ни одна из существующих ныне рекомендаций по предварительной оценке фликкер-эффекта не является полностью удовлетворительной.

UIE разработала международный измеритель фликкер-эффекта, который использует два критерия для оценки его серьезности: PSt – кратковременную дозу фликкера и PLt – длительную дозу фликкера. Этот прибор, таким образом, основан на моделировании, использовавшемся в ходе исследований, и на контрольных измерениях.

Уровень фликкер-эффекта был стандартизован включением в спецификацию рекомендаций IEC 868 (таблицы 1 и 2). Это мгновенное измерение флукуаций напряжения в диапазоне частот 0,5–35 Гц со взвешиванием по методике «lamp-eye».

После этого полученное таким образом значение уровня фликкер-эффекта подвергается анализу (расчет PSt и PLt) для проведения статистической обработки, которая и позволяет оценить серьезность воздействия фликкер-эффекта. На этом этапе статистический подход позволяет вывести функцию, отражающую корреляцию между видимым уровнем фликкер-эффекта и соответствующими долями его длительности. Серьезность воздействия фликкер-эффекта рассчитывается для стандартных промежутков времени (10 мин для коротких возмущений и 2 часа для длительных возмущений). Проведенные в Европе, США и Японии исследования промышленных установок, включая дуговые печи, показали, что использование систем SVC позволяет снизить PSt до 1,5–2,6. Этот диапазон эффективности сильно зависит от мощности печи, мощности короткого замыкания, проведенной оптимизации и от качества управления. Обычно используют несколько формул. Все они, естественно, включают мощность короткого замыкания печи (SCCF) и сети (SCCR) в общей точке подключения. Формулы эти имеют двойственное происхождение, теоретическое и эмпирическое. В них входят эмпирические коэффициенты, значения которых определяются на основе опыта пользователя.

Первая серьезная попытка оценить проблемы, вызываемые фликкер-эффектом, была предпринята в Японии на основе критерия, который используется иногда и теперь: Δv_{10} . Можно установить зависимости этого критерия с изменениями напряжения в сети $\Delta v_{10} = \Delta v_{\max}/3,6$ и с максимальной PSt:

$PSt = 3 \cdot \Delta v_{10}$, Δv_{10} выражается в %; следовательно, максимальную PSt можно выразить следующим образом:

$$PSt_{\max} \approx 3 \cdot \frac{\Delta Q_{\max} \cdot d \cdot 100}{3,6 SCCR}$$

где d – эмпирический коэффициент, имеющий значения в интервале 1–1,3.

Для PSt 99% также можно вывести формулу для оценки фликкер-эффекта от дуговой печи в общей точке подключения Pcc:

$$PSt\ 99\% = KSt \cdot \frac{SCCF}{SCCR}$$

где KSt – типичное значение (50–85) коэффициента передачи для расчета PSt.

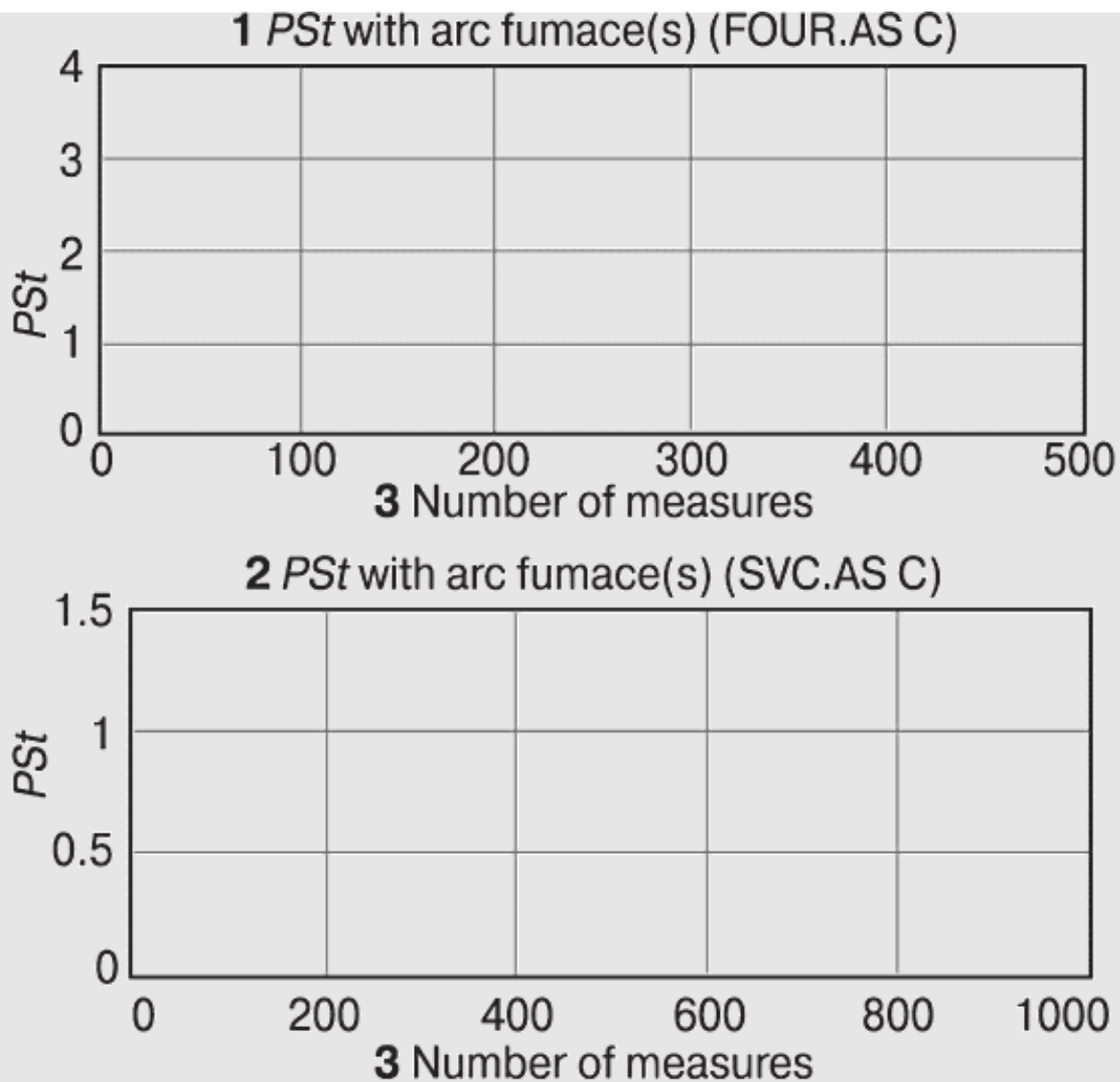
Если максимальное изменение реактивной мощности не превышает мощности короткого замыкания печи, то обе формулы становятся практически идентичными.

Расчеты PSt по этим формулам показывают, что параметры SVC тесно связаны с мощностью короткого замыкания сети в точке общего подключения. Используя TCR (реактор с тиристорным управлением), мы можем управлять реактором и косвенно конденсатором.

Восстановление баланса сети в этом случае становится возможным независимо от величин P и Q одной фазы, только за счет воздействия на активную и реактивную мощность.

На рис. 5 показано снижение величины PSt промышленной установки при наличии SVC (внизу) по сравнению с работой без SVC (вверху). Из рисунка хорошо видно улучшение ситуации в сети, при этом возникает и прирост производительности дуговой печи. Достигается снижение уровня фликкер-эффекта почти в 2 раза.

Рис. 5. Снижение величины PSt промышленной установки



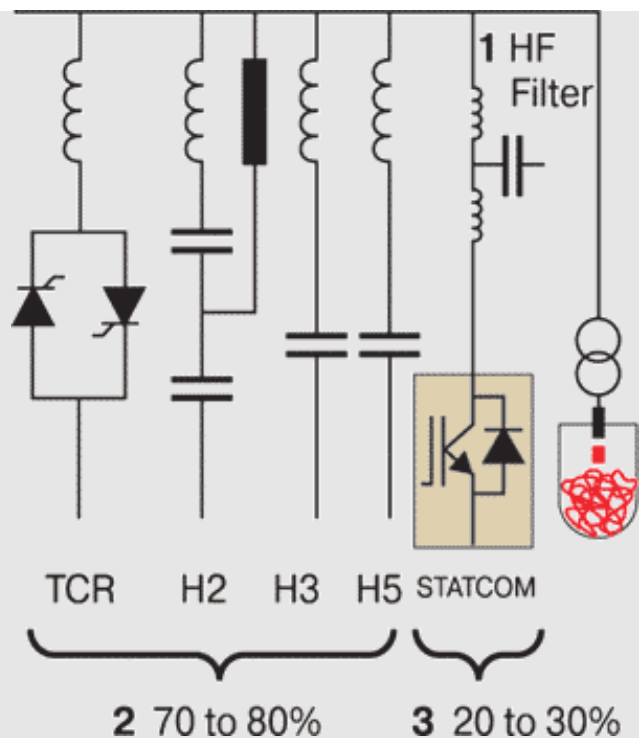
- 1 Значения PSt для дуговых печей
- 2 Значения PSt для дуговых печей с SVC
- 3 Число измерений

Вряд ли можно достигнуть большего при использовании классической тиристорной SVC. Это в основном связано с тем, что при определении PSt для оценки фликкер-эффекта принимали во внимание только достаточно высокие частоты (20–35 Гц). Однако часто возникает необходимость добиться снижения фликкер-эффекта в 4 раза. В этих условиях наиболее простым решением является увеличение мощности короткого замыкания. Но повышение SCC не всегда дается легко. Если необходимо строительство новых линий, это решение может оказаться весьма дорогостоящим.

Отсюда возникает предложение по использованию систем STATCOM. Обладая более высоким по сравнению с SVC быстродействием, они способны компенсировать быстрые изменения нагрузки. Поскольку стоимость систем STATCOM существенно выше, чем систем SVC, были предложены гибридные решения (рис. 6):

- мощность от 70 до 80% обеспечивается классическим SVC;
- мощность от 20 до 30% – обеспечивается STATCOM.

Рис. 6. Схема промышленной установки с системами SVC и STATCOM



1 Высокочастотный фильтр

2 От 70 до 80% мощности

3 От 20 до 30% мощности

Это решение разработано недавно, для того чтобы можно было оценить его эксплуатационные характеристики, однако оно явно имеет большое будущее. Для дуговой печи мощностью 100 МВА необходим источник регулируемого напряжения мощностью 20–30 МВА, основанный на IGBT или GTO. Мощность судовых силовых установок составляет около 20 МВт. В нефтехимии используются установки парового крекинга мощностью 30 МВт. Эти цифры характеризуют возможные направления промышленного применения такого решения

КОМПЕНСАЦИЯ ПОСАДОК НАПРЯЖЕНИЯ

Для защиты маломощных потребителей ответственного назначения всегда возможно применение автономных преобразователей. Проблема осложняется при более высоких потребляемых мощностях, достигающих сотен киловатт и даже десятков мегаватт (например, вариаторы скорости в нефтехимической промышленности). Поскольку для обеспечения бесперебойного течения технологического процесса при отключении электроэнергии всегда требуются накопители энергии, было бы глупо думать, что используемые в настоящее время обратные преобразователи способны хранить количество энергии, достаточное для компенсации посадок напряжения, длительность которых превышает несколько миллисекунд. Для того чтобы обеспечить 1 МВт в течение одной секунды при снижении напряжения на 100 В за счет преобразователя напряжения мощностью 1 МВт с промежуточным напряжением 800 В постоянного тока, он должен иметь батарею конденсаторов емкостью 10 фарад, что абсолютно нереально. Необходимо искать другие решения. Некоторые из них относительно универсальны, поскольку действуют на уровне сети, остальные обусловлены типом технологического процесса потребителя.

ШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Использование шин постоянного тока имеет две причины: развитие преобразователей

напряжения и необходимость уменьшить загрязнение внутренней сети предприятия гармониками. Эта технология получила наибольшее распространение в металлургии и бумажной промышленности. Если возникает необходимость перераспределять энергию между различными приводами, участвующими в производственном процессе, логично найти такое решение, которое позволит производить перераспределение без выхода в сеть переменного тока, что исключит загрязнение последней.

Рис. 7 иллюстрирует принцип действия шин постоянного тока. Некоторые установки включают в себя до 20 приводов, объединенных только общим конечным продуктом, например, листовым металлом. Последствия сбоя электроснабжения в таком случае весьма тяжелы. Только на удаление испорченного при отключении продукта из установки может потребоваться несколько часов. Следовательно, необходимо иметь хотя бы минимальный запас энергии, которая должна быть доступна в инерционной форме внутри самого технологического процесса. Если процесс не обладает достаточными ресурсами энергии, их необходимо предоставить. Можно рассмотреть несколько решений.

На рис. 8 показаны два варианта накопления энергии: один – классический, с использованием аккумуляторной батареи, второй – инерционный. Во втором случае необходимо использовать несколько систем управления, которые будут питать двигатель с большой скоростью вращения, например, 6000 об/мин, чтобы иметь необходимый запас инерции для обеспечения энергией при сбоях электроснабжения.

Рис. 7. Принцип действия шин постоянного тока

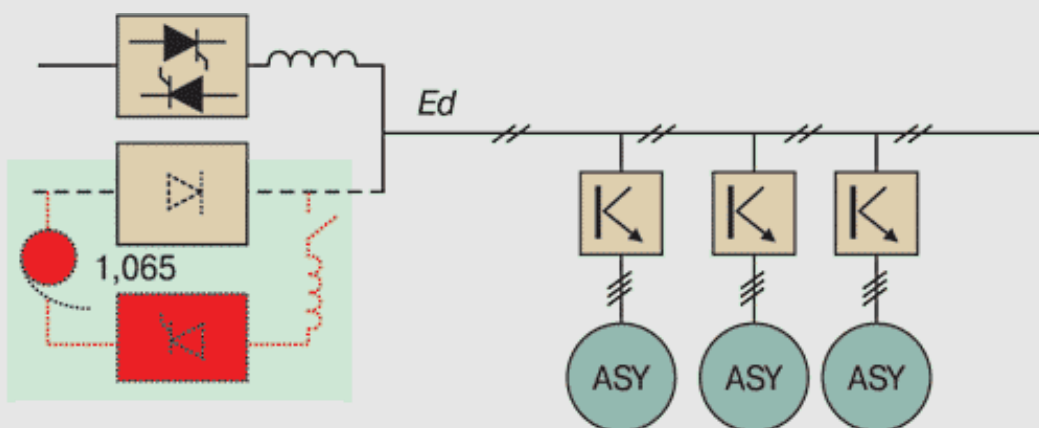


Рис. 8. Варианты накопления энергии

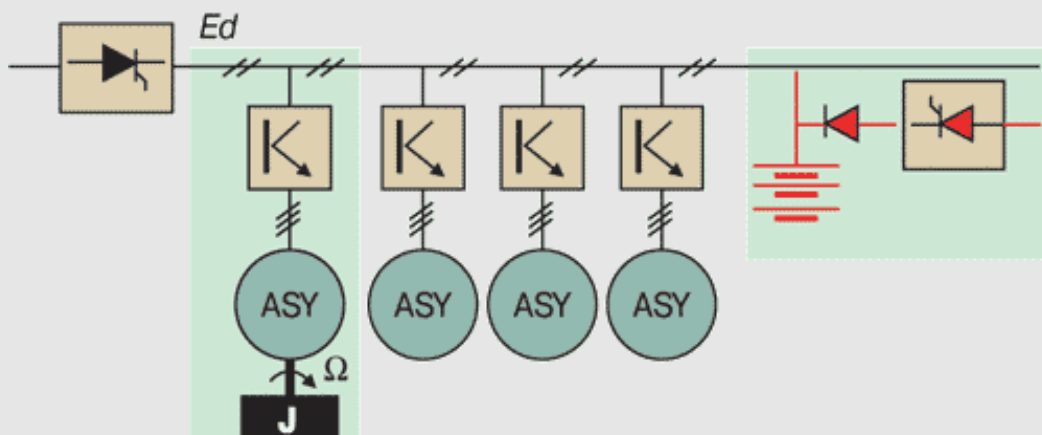
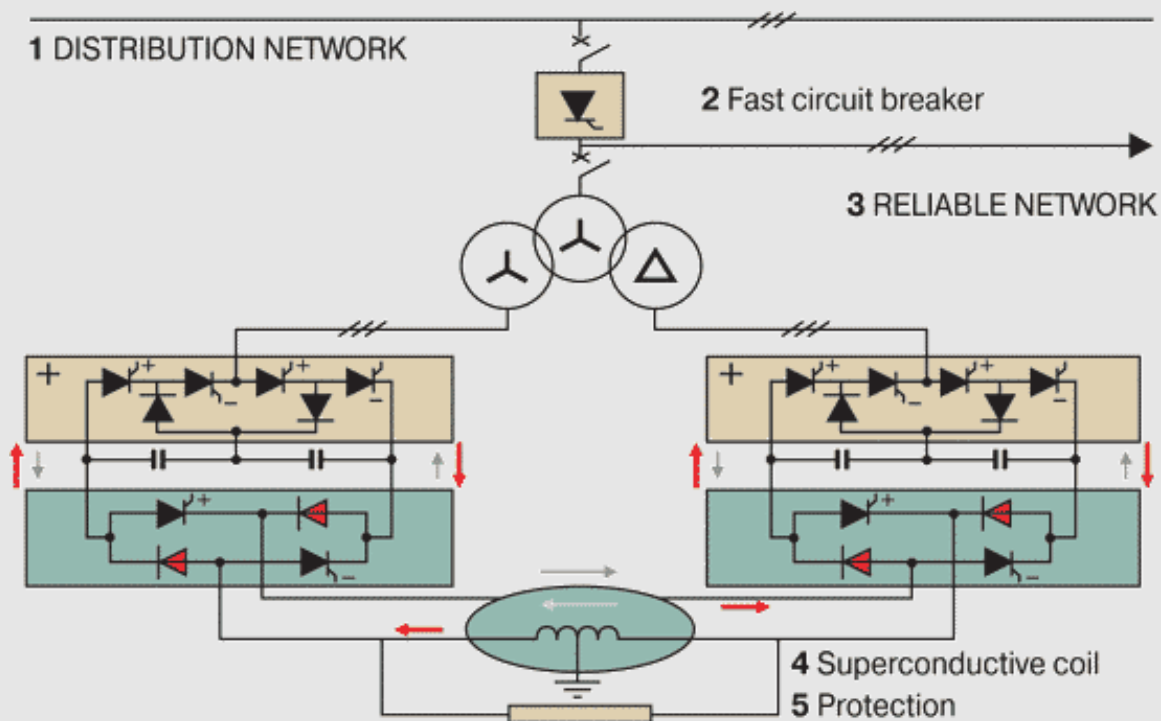


Рис. 9. Классическая компоновка системы с хранением энергии в сверхпроводящей обмотке



- 1 Распределительная сеть**
- 2 Быстродействующий разъединитель**
- 3 Надежная сеть**
- 4 Сверхпроводящая обмотка**
- 5 Защита**

Преобразователь и электродвигатель должны быть оптимизированы в смысле возвращаемой мощности и инерционного запаса энергии. Следует отметить, что инерционный принцип может способствовать выравниванию уровня мощности, забираемой из распределительных сетей циклическими технологическими процессами.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Накопители энергии используются для компенсации посадок напряжения. Сверхпроводимость является одним из наиболее многообещающих способов хранения электроэнергии, хотя в настоящее время в Европе практически не используется. В течение последних нескольких лет ныне широко используемое явление высокотемпературной сверхпроводимости получило практическое применение в нескольких установках в Канаде и в США – либо для повышения надежности работы ответственных потребителей, либо для стабилизации сетей.

На рис. 9 показана классическая компоновка системы с хранением энергии в сверхпроводящей обмотке. Принцип действия прост: ток циркулирует в сверхпроводящей обмотке, энергия из сети потребляется только для возмещения потерь. При сбое в распределительной сети (посадке напряжения) электромагнитная энергия, хранящаяся в обмотке, освобождается для подпитки «рестабилизированной» сети. Существуют установки, способные выдавать 10 МВт в течение нескольких секунд, однако типичным является 1 МВт в течение 1–2 с.

ВЫБОР НАПЯЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Распределительные сети должны соответствовать нуждам потребителей. Некоторые производственные процессы требуют мощности в несколько сотен МВт. Примером являются цехи по производству алюминия: 450 кА постоянного тока при напряжении 1000 В.

К таким предприятиям обычно приходят ЛЭП с напряжением свыше 300 кВ. И здесь возникает вопрос выбора напряжения для распределительной сети, к которой будут подключаться фильтры и компенсационное оборудование. Ответом на этот вопрос может стать организация нескольких распределительных сетей, обслуживающих одно и то же предприятие. Такое решение достаточно часто оправдывает себя, хотя бы с точки зрения надежности электроснабжения. При сбоях в сети лучше потерять 50% мощности, чем всю. Существуют простые правила для проектирования распределительных сетей:

- Токи короткого замыкания. Их значения должны быть сравнимы с параметрами имеющейся на рынке коммутационной аппаратуры (разъединителей). Разработка или применение уникальных разъединителей под специфическую задачу является стратегической ошибкой, во-первых, из-за высокой стоимости и длительности изготовления, и во-вторых, из-за возможных проблем с запасными частями и обслуживанием. При заданной мощности чем ниже напряжение, тем выше токи короткого замыкания.
- Напряжение. При заданной мощности чем выше напряжение, тем ниже ток. Это замечание относится и к гармоникам. В результате чем ниже напряжение, тем требуются большие конденсаторные батареи-фильтры.
- Полное сопротивление короткого замыкания. Чем ниже полное сопротивление, тем более тонкая фильтрация необходима для нормальной работы. В этом случае для эффективной работы фильтры должны иметь низкое сопротивление на частоте резонанса.
Если фильтрация не является полностью удовлетворительной, различные группы, питающие серию, например, электролитических ванн, не будут полностью разделены. Другими словами, отключение одной группы будет влиять на остальные группы. В результате оптимальный расчет трансформаторов групп станет невозможным и придется производить их выбор по экономическим соображениям.

ВЫВОДЫ

Сети передачи и распределения электрической энергии являются одним из важнейших ключей к будущему. Качество электроэнергии в значительной степени связано с процессами ее передачи и распределения. Оно является критическим параметром для современного производства.

Развитие электрических сетей во всем мире, рост числа межсетевых соединений предъявляют новые требования к надежности, защищенности и в особенности к качеству управления энергопотоками. Для удовлетворения этих требований XXI века появляются современные средства как на уровне проектов, так и на уровне готового оборудования. В настоящей статье описан ряд технологий и систем для решения этих проблем. Большинство из них основаны на принципах, которые были известны еще столетия назад. Решающее значение имеет вклад силовой электроники, являющейся ключом к развитию на протяжении грядущих десятилетий.

[Очередной номер](#) | [Архив](#) | [Вопрос-Ответ](#) | [Гостевая книга](#)
[Подписка](#) | [О журнале](#) | [Нормы. Стандарты](#) | [Проекты. Методики](#) | [Форум](#) | [Выставки](#)
[Тендеры](#) | [Книги, CD, сайты](#) | [Исследования рынка](#) | [Приложение Вопрос-Ответ](#) |
[Карта сайта](#)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ от закладных до модульных зданий	при ссылке на сайт скидка 5 %	606-36-25
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ		

УЧАСТНИК Rambler's	TOP 100	mail.ru	1344
4178936			687

Copyright © by news.elteh.ru

Использование материалов сайта возможно только с письменного разрешения редакции news.elteh.ru

При цитировании материалов гиперссылка на сайт с указанием автора обязательна