

Новая система повышения качества электроснабжения и обеспечения заказных показателей качества электроэнергии: OPEN UPQC

Morris Brenna, член IEEE, Roberto Faranda, член IEEE и Enrico Tironi

Аннотация – В настоящее время качество поставляемой электроэнергии имеет большое значение для некоторых пользователей. Качество электроэнергии (КЭ) по сути своей является услугой и многие потребители готовы ее оплачивать. В будущем операторы электроэнергетического рынка могут принять решение снабжать своих потребителей электроэнергией с различными уровнями качества или получить соответствующее предписание от государственных органов. Для реализации такого электроснабжения может быть использована новая установка - унифицированный кондиционер электроэнергии (UPQC), состоящий из полупроводникового фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ), включаемого последовательно с нагрузкой на подстанциях высокого/среднего напряжения, а также нескольких полупроводниковых ФКУ, устанавливаемых параллельно с нагрузкой в непосредственной близости от конечных потребителей. Последовательные и параллельные ФКУ не имеют общего звена постоянного тока, в связи с чем их алгоритмы работы отличаются от традиционных алгоритмов UPQC. Предлагаемая система позволяет обеспечить общее повышение качества электроэнергии за счет снижения наиболее типичных артефактов сетевого напряжения для всех потребителей при использовании только последовательного ФКУ. Для критичных потребителей дополнительное повышение КЭ (например, устранение просадов напряжения) может быть обеспечено с помощью дополнительных параллельных ФКУ. Таким образом, новое решение позволяет сочетать повышение КЭ для всех конечных потребителей со снижением затрат для потребителей с высокими требованиями к качеству электроэнергии. В статье приведено описание предлагаемой системы и анализ ее поведения в установившемся режиме с использованием модели «тестовой сети» мощностью 400 кВА. Полученные для установившегося режима результаты подтверждают правильность выбранного технического решения.

Ключевые слова – активный кондиционер электроэнергии, категоризация потребителей по качеству электроэнергии, интерфейсные устройства, унифицированный кондиционер электроэнергии OPEN (UPQC), качество электроэнергии (PQ), унифицированный кондиционер электроэнергии (UPQC).

I. ВВЕДЕНИЕ

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ (PQ) имеет большое значение для многих потребителей. Поэтому многие поставщики могли бы продавать электроэнергию своим потребителям по различным тарифам, зависящим от ее качества.

Поскольку большинство конечных потребителей подключены ко вторичным распределительным электросетям низкого напряжения важное значение приобретает наличие возможности мониторинга возмущений в таких сетях и их компенсации. В частности в обзоре [1] сообщалось, что на юго-востоке США большинство промышленных и иных крупных потребителей не страдали от продолжительных отключений электроэнергии. Чаще всего источником проблем являлись кратковременные просадки напряжения и перебои в питании. Вследствие этого местные сетевые компании вынуждены были изменить конфигурацию своих систем таким образом, чтобы исключить возможность отключения наиболее критичных потребителей.

На рис. 1 показано распределение просадок напряжения в зависимости от времени суток в юго-восточных штатах США 4-го и 5-го декабря 2002 г. Из приведенного графика можно видеть, что основная масса просадок лежит в пределах 10-20% от нормального напряжения в сети.

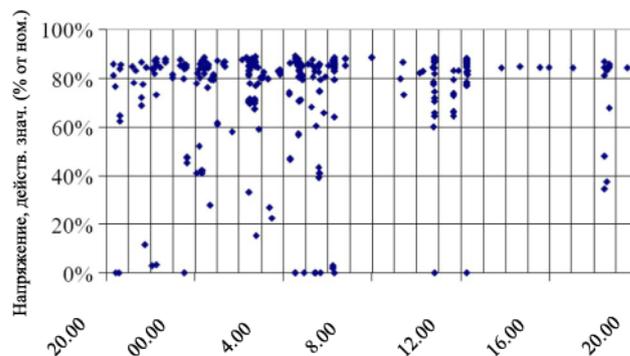


Рис. 1. Распределение просадок напряжения в юго-восточных штатах США 4-го и 5-го декабря 2002 г.

Для устранения описанных выше артефактов в электросетях были предложены различные технические решения. Одно из этих решений заключается в повышении токов короткого замыкания энергосистемы, например за счет замены вторичных кабелей или увеличения мощности трансформаторов понижающих подстанций. При этом качество электроэнергии повышается для всех конечных потребителей. В этом случае все возмущения, возникающие со стороны нагрузки (напр. гармоники) или обусловленные аварийными процессами на ЛЭП, снижаются в точке общей связи (point of common coupling, PCC). Поэтому такое решение позволяет эффективно снизить амплитуду колебаний напряжения, но не обеспечивает защиту нагрузок от переходных процессов и кратковременных перебоев питания. Еще одним решением, позволяющим компенсировать любые возмущения, является установка сетевых, автономных и гибридных систем бесперебойного питания [2]. Во всех этих случаях обеспечивается защита только тех потребителей, которые решили установить такие системы. Однако остальные потребители не получают никакого улучшения качества электроэнергии.

Зачастую подобные технические решения неприемлемы для локальных сетевых компаний или конечных потребителей, поскольку достигаемое повышение электроэнергии оказывается слишком дорогим. Тем не менее, существуют менее дорогостоящие способы решения проблемы.

В частности были разработаны, исследованы и вынесены на суд международного сообщества несколько электронных устройств, призванных обеспечить повышение качества электроэнергии. В [3]-[10] анализируются различные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) для локальной (одиночной) установки. При этом используются различные способы подключения к энергосистеме (последовательно и параллельно с сетью). Последовательные ФКУ подключаются со стороны поступления мощности, в то время как параллельные - параллельно чувствительным нагрузкам. В целом оба типа ФКУ повышают качество электроэнергии, поступающей к нагрузкам ([3]-[7] – последовательные ФКУ и [8]-[10] – параллельные ФКУ).

В ряде исследований были предприняты попытки изучить различные сочетания упомянутых одиночных ФКУ (напр. ИБП, UPLC, UPQC и т.д.). Унифицированный кондиционер электроэнергии (UPQC) выглядит особенно перспективным устройством для решения рассматриваемых задач. Устройство представляет собой последовательное и параллельное ФКУ с общим звеном постоянного тока, обеспечивающего возможность перетока мощности. Оно обеспечивает улучшение формы тока, потребляемого из сети, и формы напряжения на нагрузке [2], [11]. Однако подобные устройства не позволяют локальным поставщикам разделить потребителей в зависимости от требуемого качества поставляемой электроэнергии, т.к. происходит его повышение для всех подключенных потребителей. Соответственно затраты на повышение качества электроэнергии до требуемого уровня оказываются достаточно высокими. Предлагаемое техническое решение, OPEN UPQC, имеет все преимущества вышеописанного, но при этом позволяет снизить затраты.

Новое решение, рассмотренное в [12], [13], построено на тех же принципах, что и UPQC, но отличается отсутствием звена постоянного тока и дроблением параллельного ФКУ на несколько отдельных установок, включаемых параллельно нагрузкам. Как следствие алгоритм управления такой системы отличается от такового для традиционных комбинированных (параллельно-последовательных) ФКУ, несмотря на то, что улучшение формы тока и напряжения оказывается примерно на том же уровне. Важнее всего то, что OPEN UPQC способен повышать коэффициент мощности и стабилизировать напряжение на нагрузке, что позволяет сделать ток в электросети практически синусоидальным и симметричным по фазам.

Центральное последовательное ФКУ устанавливается на понижающей подстанции. При работе в составе централизованной электросети оно позволяет стабилизировать напряжение на шине низшего напряжения (т.е. точке общей связи) аналогично последовательному ФКУ, рассмотренным в [3]-[7]. Параллельные ФКУ не влияют на динамику последовательного устройства, поскольку их время отклика при рассматриваемых условиях работы значительно больше. В [6] и [7] моделируется поведение одиночного компенсатора просадов напряжения и определяется его рабочий диапазон. В частности анализируется поведение устройства при наличии просадов напряжения (т.е. при отклонениях напряжения на 10-20%).

Несколько параллельных ФКУ устанавливаются вблизи конечных потребителей, которым требуется электроэнергия высокого качества. При наличии накопителей электроэнергии они могут обмениваться активной и реактивной мощностью с энергосистемой. При этом возможен обмен реактивной мощностью в пределах конкретной электросети (особенно в сетях с центральной подстанцией), что позволяет улучшить характеристики последовательного ФКУ и расширить его рабочий диапазон. С другой стороны при выходе напряжения в точке общей связи потребители могут отключаться от электросети с переходом на питание от резервных источников.

II. СИСТЕМА OPEN UPQC

Большинство флуктуаций напряжения со стороны потребителей характеризуется малой продолжительностью и относительно небольшой амплитудой. Несмотря на это, они могут приводить к нарушению производственных процессов. Как можно видеть на рис. 2, большинство просадов имеют небольшую продолжительность и амплитуду [14].

Свыше 95% всех просадов напряжения могут быть скомпенсированы путем приложения напряжения, не превышающего 60% его номинального значения, на время, не превышающее 30 периодов. Эти данные являются исходными для выбора требуемой мощности OPEN UPQC.

Последовательное ФКУ OPEN UPQC, имеющее мощность, равную 60% мощности сети по шине низкого напряжения и небольшой накопитель энергии, способно компенсировать подавляющее большинство флуктуаций напряжения, показанных на рис.2. Оно имеет те же функции, что и «динамический компенсатор провалов» (DVR) [6], [7].

Диаграмма распределения флуктуаций по продолжительности

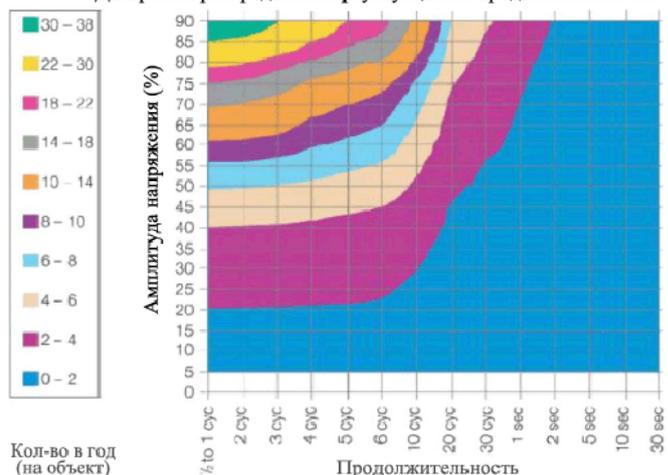


Рис. 2. Пример распределения флуктуаций напряжения, зарегистрированных в отчете EPRI.

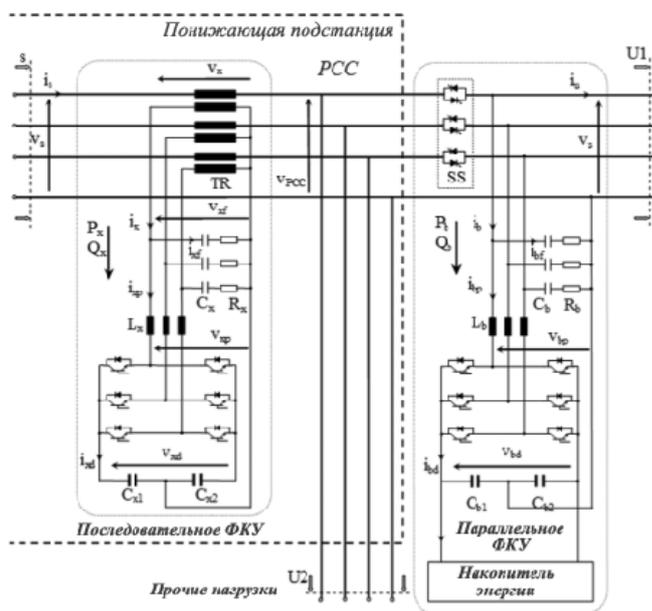


Рис. 3. Функциональная схема предлагаемого технического решения.

Каждое параллельное ФКУ выбирается исходя из мощности нагрузки, и способно защитить ее от перебоев в питании. Функция параллельного ФКУ аналогична функции выходного каскада ИБП [2], [16]; при этом ФКУ имеет меньшую стоимость, содержит только одну ступень преобразования и соответственно имеет меньшие потери.

На рис.3 показана функциональная схема устройства, работающего в трехфазной четырехпроводной распределительной сети.

Последовательное ФКУ содержит согласующий трансформатор (TR), первичная обмотка которого включена последовательно с фазами сети (т.е. в «разрыв»), а вторичная соединена с реверсивным преобразователем, который может работать как в режиме выпрямителя, так и в режиме инвертора. Выходной каскад преобразователя с ШИМ содержит пассивные фильтры (RC-цепи), подавляющие токи гармоник, кратных частоте коммутации силовых ключей. Если пренебречь потреблением активной мощности, обусловленным потерями в преобразователе, последовательное ФКУ работает в режиме индуктивности, при условии, что напряжение питания остается в допустимом диапазоне ($0.9 \cdot V_n < V_s < 1.1 \cdot V_n$). Это имеет принципиальное значение, т.к. напряжение, подаваемое к нагрузкам, в соответствии со стандартом IEEE №1159 «Указания IEEE по мониторингу качества электроэнергии» и европейской директивой EN50160 должно находиться в указанном диапазоне в течение 95% времени. При этом не должны задействоваться накопители энер-

гии. Вне указанного диапазона для компенсации флуктуаций напряжения может использоваться активная мощность, аналогично тому, как это происходит в последовательных ФКУ [6], [7] при наличии накопителей электроэнергии.

Параллельные ФКУ содержат полупроводниковый преобразователь, аналогичный таковому в последовательном ФКУ, подключенный к системе аккумулирования энергии. Кроме того, в состав параллельных ФКУ входят несколько бесконтактных выключателей SS [17]. В зависимости от напряжения в сети параллельное ФКУ может питать как всю нагрузку, так и ее часть.

Система OPEN UPQC имеет два различных режима работы:

- *режим компенсатора*: при падении напряжения в точке общей связи в пределах нормы бесконтактные выключатели замкнуты, при этом последовательное ФКУ работает в режиме трехфазного источника напряжения, а параллельные ФКУ – в режиме источников тока;
- *режим резервного источника*: при выходе напряжения в точке общей связи за допустимые пределы выключатели размыкаются, отключая сеть от системы компенсации нагрузки. Каждая критичная нагрузка в этом случае запитывается от параллельных ФКУ, которые работают в режиме источников синусоидального напряжения, используя накопленную энергию.

III. ХАРАКТЕРИСТИКИ OPEN UPQC

В данном параграфе рассматриваются пределы компенсирующей способности OPEN UPQC. Далее приводится анализ поведения системы в установившемся режиме с целью определения компенсирующей способности при *нормальном* режиме работы ($0.9 \cdot V_n < V_s < 1.1 \cdot V_n$).

Важно иметь в виду, что мощность, потребляемая нагрузками и параллельными ФКУ, влияет на работу последовательного ФКУ и OPEN UPQC в целом. Поэтому при рассмотрении конкретных условий нагрузки можно определить, при каких условиях работы параллельных ФКУ будет достигаться улучшение компенсирующих свойств последовательного ФКУ.

В зависимости от наличия или отсутствия накопителей электроэнергии (аккумулирующих систем) последовательные и параллельные ФКУ могут обмениваться с сетью только *реактивной* мощностью или же *активной* и *реактивной* мощностью. В последнем случае, как будет показано далее, OPEN UPQC может лучше компенсировать кратковременные колебания напряжения.

Все нижеприведенные случаи рассматриваются в предположении, что все напряжения на различных участках сети синусоидальны и содержат только компоненты прямой последовательности.

Следует еще раз отметить, что при правильном выборе и управлении ФКУ в составе OPEN UPQC обеспечивается широкий диапазон компенсации артефактов напряжения в сети, сравнимый с диапазоном для ИБП, при лучших экономических показателях системы. Согласованная работа различных ФКУ требует наличия системы обмена данными (напр. с использованием ВЧ-связи по ЛЭП), однако такая система не может обеспечить высокую скорость обмена. Более того, особенности поведения реальной системы связи между последовательным и параллельными ФКУ невозможно учесть при анализе переходных процессов (связь может оказаться слишком медленной, некорректной и т.п.). Поэтому устройства рассчитываются на автономную работу. Поведение индивидуальных ФКУ в динамике рассматривается в [3]-[10] и [15].

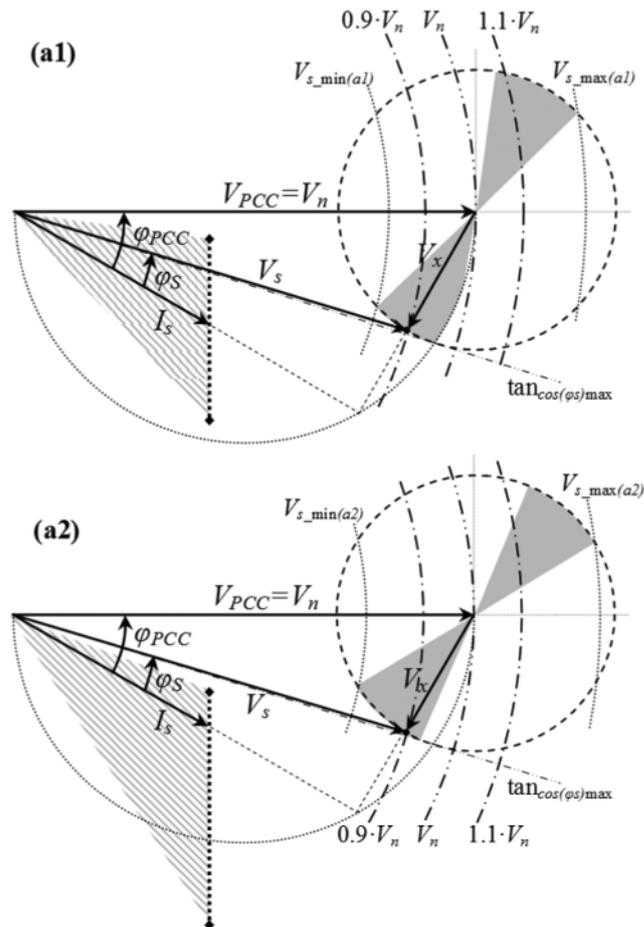


Рис. 4. Компенсация по напряжению с обменом чисто реактивной мощностью. Случай (a1): есть возможность получить коэффициент мощности близкий к 1 в точке S на шине НН. Случай (a2): коэффициент мощности всегда ниже 1.

A. Обмен реактивными мощностями Q_b и Q_x

Для ситуаций, когда напряжение в системе V_s лежит в пределах стандартов (*нормальный* режим работы), должна быть подтверждена возможность работы с обменом только реактивной мощностью.

В *нормальном* режиме работы максимальное падение напряжения на шинах НН не должно превышать 5%, что соответствует минимальным потерям. Поэтому если все преобразователи работают на стабилизацию напряжения в точке общей связи (PCC), напряжение на нагрузках составит не менее 95% номинальной величины. Такой результат приводит к улучшению одного из показателей качества электроэнергии – стабильности реального значения напряжения для всех потребителей. Соответственно OPEN UPQC работает на стабилизацию напряжения в точке общей связи. Векторная диаграмма для OPEN UPQC показана на рис.4.

Для того чтобы исключить «вливание» *активной* мощности вносимое напряжение V_x должно быть сдвинуто на 90° относительно тока в сети I_s . Серые зоны на рис.4 дают диапазон возможных значений V_x , при этом V_x определяется выражением:

$$\bar{V}_x = \bar{V}_{PCC} \cdot \frac{\sin(\varphi_{PCC} - \varphi_s)}{\cos(\varphi_s)} \quad (1)$$

Ток I_s преимущественно состоит из токов незащищенных нагрузок U_2 (для которых сдвиг фаз относительно V_{pcc} не может изменяться) и тока защищенных нагрузок U_1 (для которых сдвиг фаз относительно V_{pcc} может регулироваться с помощью параллельных ФКУ):

$$I_s = \frac{P_{U1} + P_{U2} + P_{losses} + j \cdot (Q_{U1} + Q_b + Q_{U2} + Q_{losses})}{V_{PCC}} \quad (2)$$

где $P_{U1,2}$ и $Q_{U1,2}$ – активная и реактивная мощности эквивалентной нагрузки $U_{1,2}$ соответственно, P_{losses} и Q_{losses} – активные и реактивные потери в ЛЭП соответственно, а Q_b – реактивная мощность, генерируемая в сеть всеми параллельными ФКУ.

Поэтому угол φ_{PCC} может колебаться между верхним и нижним пределами φ_{PCC_max} и φ_{PCC_min} , получаемых при $Q_b = A_1$ и $Q_b = -A_1$ соответственно в зоне, выделенной на рис.4. Угол может быть рассчитан по уравнению, приведенному внизу на следующей странице.

Вектор тока I_s может перемещаться вдоль пунктирной линии одновременно с изменением реактивной мощности Q_b параллельных ФКУ. В частности, в случае (a1) возможно добиться коэффициента мощности, равного 1, в точке S на шине НН, т.к. прямая $\tan_{\cos(\varphi_s)max}$ пересекает пунктирную линию. В случае (a2) коэффициент мощности всегда меньше 1.

Величины V_{s_max} и V_{s_min} могут быть получены из (4) и (5), как показано на следующей странице внизу.

Полагая, что V_{s_max} и $V_{s_min} \approx 2 \cdot V_{pcc}$, ширина диапазона $V_{s_max} - V_{s_min}$ может быть получена из (6):

$$V_{s_max} - V_{s_min} \approx 2 \cdot V_{x_max} \cdot \sin(\varphi_{PCC_max}). \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что ширина диапазона компенсации $V_{s_max} - V_{s_min}$ зависит от величины V_{x_max} , которую способно обеспечить последовательное ФКУ, а также от реактивной мощности Q_b . На реактивную мощность влияют перетоки энергии в параллельных ФКУ (длина пунктирной линии, пропорциональная кажущейся мощности нагрузок U_1) и коэффициенты мощности эквивалентных нагрузок U_1 и U_2 .

В нормальном режиме работы могут быть реализованы различные технологии компенсации. Например можно реализовать поддержание максимального коэффициента мощности в точке S (что соответствует минимизации тока I_s) путем согласованной работы последовательного ФКУ и параллельных ФКУ. При этом необходимо обеспечить связь между всеми ФКУ. Простейшим решением является организация медленной связи, которая позволяет OPEN UPQC стабилизировать напряжение в точке PCC, что позволяет получить максимальный коэффициент мощности при нормальных условиях работы и повысить компенсирующую способность за пределами нормального диапазона напряжений. Очевидно, что в случае мощных возмущений V_{pcc} , которые последовательное ФКУ компенсировать не в состоянии, каждое параллельное ФКУ становится источником резервной мощности.

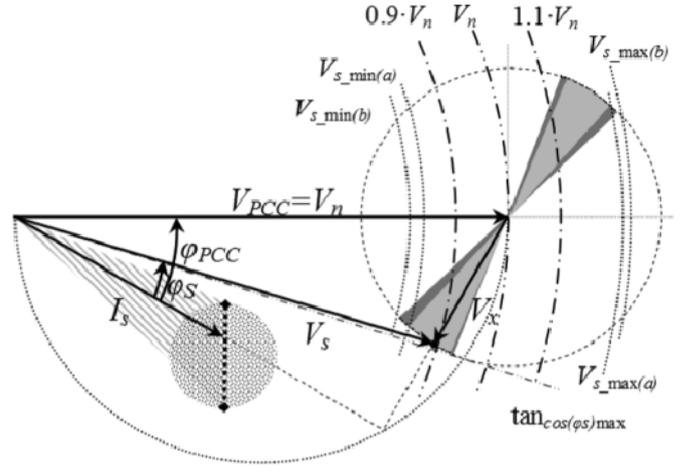


Рис. 5. Пределы компенсирующей способности OPEN UPQC: при обмене чисто реактивной мощностью (светло-серый) и при наличии обмена активной мощностью с параллельными ФКУ.

B. Обмен реактивными мощностями Q_b и Q_x и активной мощностью P_b

В этом случае последовательное ФКУ генерирует только реактивную мощность, при этом параллельные ФКУ обмениваются с сетью как активной так и реактивной мощностью. Такой случай можно рассматривать как активную сеть, в различные точки которой внесены генераторы. На рис.5 приведены векторные диаграммы для OPEN UPQC при вышеуказанных условиях.

Чтобы исключить необходимость генерации активной мощности последовательным ФКУ, разность фаз между напряжением V_x и током I_s должна составлять 90° . На рис.5 светло-серым цветом показана область, в пределах которой V_x может находиться без поступления активной мощности от параллельных ФКУ, а темно-серым – область значений V_x , требующих от параллельных ФКУ генерации активной мощности. В этом случае диапазон компенсации $V_{s_max} - V_{s_min}$ становится шире, чем без перетока активной мощности, однако следует отметить, что разница невелика. Вектор тока I_s может перемещаться в пределах заштрихованного круга при изменении активной и реактивной мощностей, генерируемых параллельными ФКУ (при этом в отсутствие обмена активной мощностью перемещение происходит по пунктирной линии).

$$\cos(\varphi_{PCC}) = \frac{P_{U1} + P_{U2} + P_{losses}}{\sqrt{(P_{U1} + P_{U2} + P_{losses})^2 + (Q_{U1} + Q_b + Q_{U2} + Q_{losses})^2}} \quad (3)$$

$$V_{s_min} = \sqrt{V_{x_max}^2 + V_{PCC}^2 - 2 \cdot V_{PCC} \cdot V_{x_max} \cdot \sin(\varphi_{PCC_max})} \quad (4)$$

$$V_{s_max} = \sqrt{V_{x_max}^2 + V_{PCC}^2 + 2 \cdot V_{PCC} \cdot V_{x_max} \cdot \sin(\varphi_{PCC_max})} \quad (5)$$

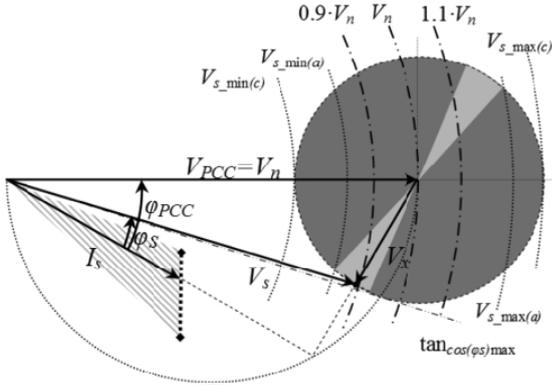


Рис. 6. Пределы компенсирующей способности OPEN UPQC: при обмене чисто реактивной мощностью (светло-серый) и при наличии обмена активной мощностью с последовательным ФКУ.

C. Обмен реактивными мощностями Q_i и Q_x и активной мощностью P_x

Для обмена активной мощностью с сетью к звену постоянного тока последовательного ФКУ должен быть подключен накопитель энергии. При этом не требуется иметь накопитель больших размеров, поскольку для компенсации большинства флуктуаций напряжения требуется относительно небольшое количество энергии. Например, для компенсации большинства флуктуаций, показанных на рис.2 (просадка напряжения до 60% номинального при продолжительности 30 циклов), при нагрузке в 400 кВт требуется энергия 120 кДж. Это соответствует батарее емкости около 0.4 А•ч при 96 В или конденсаторной батарее емкостью порядка 1.5 Ф при 400 В.

При наличии накопителя, имеющего емкость вдвое больше указанной выше, появляется возможность компенсации колебаний напряжения V_s , выходящих за пределы стандартов, за счет двунаправленного обмена энергией с сетью.

В случае перебоев в питании, длящихся свыше 30 с, выключатели SS параллельных ФКУ размыкаются, в результате чего нагрузки запитываются от ФКУ, работающих в качестве резервных источников.

Если говорить о компенсации переходных возмущений, таких как просадки и выбросы напряжения, для OPEN UPQC могут быть использованы различные алгоритмы работы. В их числе и алгоритмы, обеспечивающие минимизацию размера накопителя энергии последовательного ФКУ. Новая векторная диаграмма для OPEN UPQC показана на рис.6. На ней в областях, выделенных светло-серым цветом, напряжение последовательного ФКУ V_x и ток сети I_s должны иметь разность фаз в 90° , поскольку обмен активной мощностью с последовательным ФКУ не допускается. В указанных областях поведение OPEN UPQC аналогично случаям, рассмотренным выше.

В случае возмущений, обусловленных переходными процессами, последовательное ФКУ может обеспечивать стабилизацию (компенсацию возмущений) напряжения V_s в очень широком диапазоне (ширина диапазона компенсации $V_{s,max(c)}$ - $V_{s,min(c)}$) по сравнению со всеми случаями, рассмотренными выше. Действительно, последовательное ФКУ может обмениваться активной мощностью с сетью в темно-серых областях векторной диаграммы. Тем не менее, из-за ограниченного размера накопителя энергии последовательного ФКУ это возможно только при кратковременных переходных процессах.

IV. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Ниже описан алгоритм управления, который может использоваться в *нормальном* режиме работы ($0.9 \cdot V_n \leq V_s \leq 1.1 \cdot V_n$) при установленном характере процессов. Этот алгоритм объясняет и характеристики системы.

Поведение системы при переходных процессах в данной работе не рассматривается, т.к. оно подробно рассмотрено в [15], [17]. Например, если говорить о поведении последовательного ФКУ в динамике, то можно видеть, что влияние параллельных ФКУ во время переходных процессов отсутствует. Это связано с невысоким быстродействием системы связи, исключающем возможность использования синхронизированных алгоритмов управления.

Для компенсации напряжений при *нормальном* режиме работы можно использовать алгоритм, предполагающий достижение максимального $\cos(\varphi_s)$ (что соответствует минимальному току I_s). В этом случае снижается кажущаяся (полная) мощность, потребляемая сетью.

Ток сети I_s рассчитывается по (2), а «скомпенсированное» напряжение V_{PCC} составляет:

$$\bar{V}_{PCC} = \bar{V}_s - \bar{V}_x. \quad (7)$$

Если пренебречь потерями и учесть, что напряжение V_x должно быть сдвинуто относительно тока I_s на 90° , можно получить следующее соотношение:

$$\bar{I}_s = \frac{P_{U1} + P_{U2} + j \cdot (Q_{U1} + Q_b + Q_{U2})}{\bar{V}_s - j \cdot x \cdot \bar{I}_s} \quad (8)$$

где x – эквивалентное реактивное сопротивление последовательного ФКУ, дающее напряжение, пропорциональное I_s . Решение уравнений (7) и (8) достаточно сложно из-за нелинейности системы, и использование их в программном обеспечении системы управления нецелесообразно.

Более удобным представляется использование двух ПИ-регуляторов – одного для регулирования V_x последовательного ФКУ и второго – для формирования сигнала K_{Qb} , связанного с реактивной мощностью Q_b , которую должны выдать все параллельные ФКУ.

Условия, при которых последовательное ФКУ может обмениваться только *реактивной* мощностью, можно получить применив преобразование Парка к фазным токам I_{s-a} , I_{s-b} и I_{s-c} , в результате чего получаются два компонента I_{s-d} и I_{s-q} во вращающейся системе координат:

$$\begin{bmatrix} I_{s-d} \\ I_{s-d} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{s-a} \\ I_{s-b} \\ I_{s-c} \end{bmatrix} \quad (9)$$

где угол $\theta = 2\pi \cdot f \cdot t$ и f – частота сети. Соответственно компоненты вводимого напряжения V_x в осях $d-q$ должны быть пропорциональны компонентам тока I_s в осях $d-q$:

$$\begin{aligned} V_{x-d} &= -K_{Vx} \cdot I_{s-q} \\ V_{x-q} &= K_{Vx} \cdot I_{s-d} \end{aligned} \quad (10)$$

Для того чтобы коэффициент K_{Vx} не зависел от условий нагрузки, предыдущие выражения необходимо привести к относительным единицам. При этом в качестве базовой величины примем модуль тока нагрузки. В результате получим:

$$\begin{aligned} V_{x-d} &= -K_{Vx} \cdot \frac{I_{s-q}}{\sqrt{I_{s-d}^2 + I_{s-q}^2}} \\ V_{x-q} &= K_{Vx} \cdot \frac{I_{s-d}}{\sqrt{I_{s-d}^2 + I_{s-q}^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

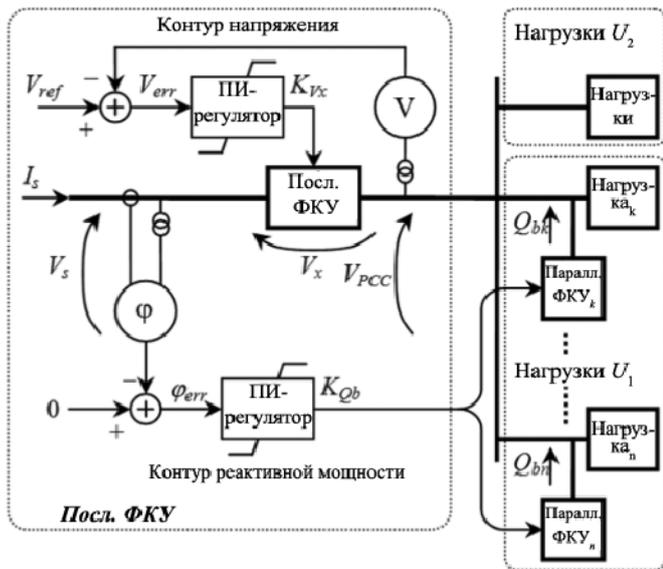


Рис. 7. Контур напряжения последовательного ФКУ и контур регулирования реактивной мощности параллельных ФКУ в системе OPEN UPQC.

Коэффициент K_{Vx} формируется ПИ-регулятором, обеспечивающим поддержание напряжения V_{PCC} на выходе последовательного ФКУ равным номинальному значению V_{ref} , как показано на рис.7.

Второй контур обеспечивает поддержание минимального угла ϕ_s между напряжением V_s и током I_s со стороны нагрузки трансформатора подстанции, что обеспечивает максимальный коэффициент мощности в точке S . Здесь ПИ-регулятор формирует сигнал K_{Qb} , изменяющийся в пределах от 0 до 1 и равный отношению между желаемой вносимой реактивной мощностью, генерируемой параллельными ФКУ, и максимальной вносимой реактивной мощностью. Этот сигнал посылается ко всем параллельным ФКУ через каналы связи. Таким образом, вносимая (отдаваемая в сеть) реактивная мощность для k -го ФКУ Q_{bk} равна:

$$Q_{bk} = K_{Qb} \cdot A_k \quad (12)$$

где A_k – номинальная мощность ФКУ. Полная реактивная мощность, вносимая всеми параллельными ФКУ, составляет:

$$Q_b = \sum_{k=1}^n Q_{bk} \quad (13)$$

Очевидно, что такой алгоритм компенсации, позволяющий получить малое время реакции последовательного ФКУ, требует внесения в сеть реактивной мощности параллельными ФКУ для получения широкого диапазона компенсации.

Ради улучшения работы всей системы потери и падения напряжения в линиях НН должны несколько возрасти. Однако в точке РСС поддерживается высокий коэффициент мощности (>0.8) и как следствие повышение потерь пренебрежимо мало. Кроме того, указанное повышение может быть ограничено путем передачи к каждому параллельному ФКУ сигнала K_{Qbk} . Это позволяет использовать для ввода реактивной мощности ближайšie параллельные ФКУ, избегая бесполезных перетоков реактивной мощности.

V. «Тестовая сеть» и оценка пределов компенсации

На рис.8 показана упрощенная сеть низкого напряжения мощностью 400 кВА, используемая для подтверждения характеристик OPEN UPQC.

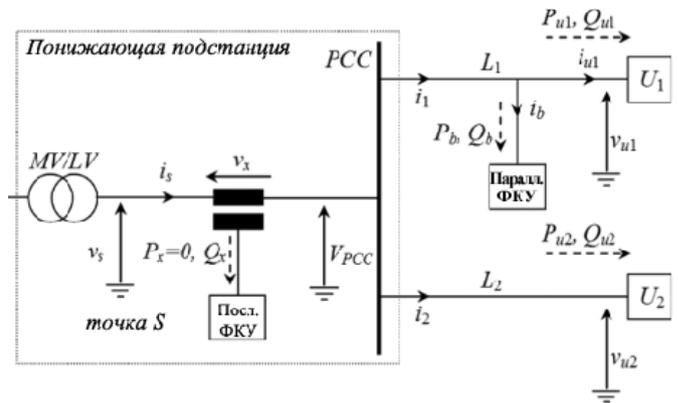


Рис. 8. Структура системы компенсации.

ТАБЛИЦА I
ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА СН/НН

Мощность (кВА)	k	R (мОм)	X (мОм)	P _{CC} (%)	P _{Fe} (%)
400	20/0.4	3.6	15.6	0.9	0.19

ТАБЛИЦА II
ПАРАМЕТРЫ КАБЕЛЯ НИЗКОГО НАПЯЖЕНИЯ

Сечение (мм ²)	R при 80 °C (Ом/км)		X (Ом/км)
	Cu	Al	
6	3.78	6.27	0.0955
10	2.27	3.76	0.0861
16	1.43	2.37	0.0817
25	0.907	1.50	0.0813
35	0.654	1.08	0.0783
50	0.483	0.800	0.0779
70	0.334	0.554	0.0751
95	0.241	0.400	0.0762
150	0.157	0.261	0.0745
240	0.0966	0.160	0.0752

Защищаемые нагрузки сгруппированы в эквивалентную нагрузку U_1 , соответственно все параллельные ФКУ представляются одним эквивалентным ФКУ. Аналогично все незащищаемые нагрузки сгруппированы в эквивалентную нагрузку U_2 .

Все параметры трехфазного трансформатора (ВН/НН), использованного при моделировании, приведены в таблице I.

Все низковольтные кабели, использованные при анализе с нагрузками U_1 и U_2 и различными коэффициентами мощности приведены в таблице II.

При выполнении каждого из расчетов, исходя из тока, потребляемого эквивалентной нагрузкой, выбирался кабель длиной 200 м с падением напряжения не более 3% (без учета OPEN UPQC). Таким образом, потерями и падениями напряжения в сети НН можно пренебречь.

В данном исследовании все преобразователи представлялись идеализированными источниками тока и напряжения. Кроме того, последовательное ФКУ не содержало накопителя энергии. Поэтому пределы компенсирующей способности OPEN UPQC далее рассматриваются при нормальном режиме работы, и последовательное ФКУ не обладает способностью отдавать в сеть активную мощность.

Приведенные далее рисунки и таблицы отражают зависимости коэффициента мощности $\cos(\phi_s)$ и тока I_s в точке S от напряжения в сети V_s . Каждый график построен для фиксирован

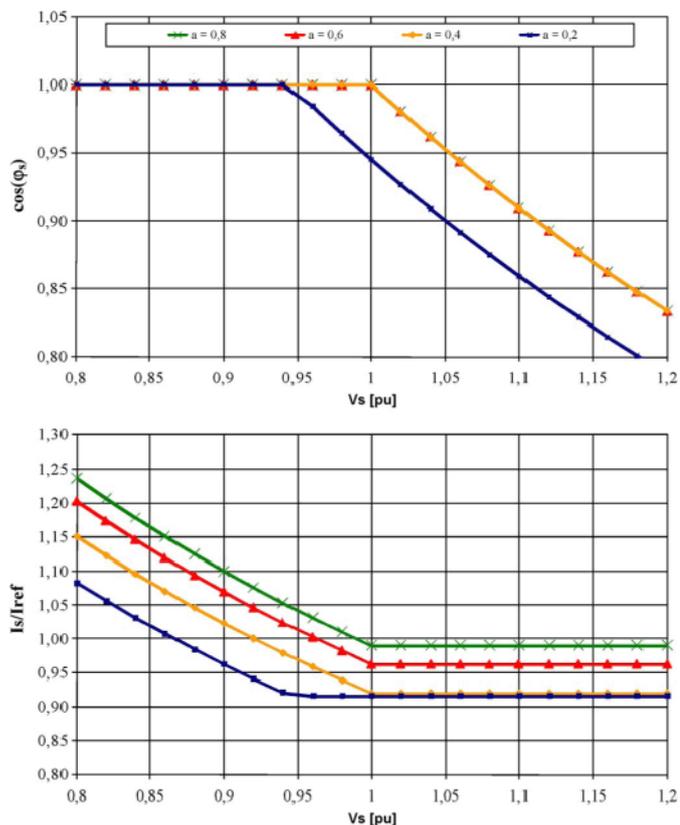


Рис. 9. Коэффициенты мощности в системе и максимальные токи в ЛЭП для случая 1 при различных значениях α . Максимальное напряжение, вносимое последовательным ФКУ составляет 0.6 о.е.

ных нагрузок U_1 и U_2 и различных значений α . Этот параметр представляет собой отношение кажущихся мощностей полных нагрузок параллельных ФКУ A_{U1} и суммарной кажущейся мощности нагрузок A_{ref} .

$$\alpha = \frac{|\overline{A_{U1}}|}{|\overline{A_{U1}} + \overline{A_{U2}}|} = \frac{A_{U1}}{A_{ref}}. \quad (14)$$

При фиксированном A_{U1} и, соответственно, фиксированном α можно рассчитать значение A_{U2} , которое является функцией коэффициентов мощности нагрузок $\cos(\varphi_1)$ и $\cos(\varphi_2)$:

$$\frac{A_{U2}}{A_{ref}} = \sqrt{1 - \alpha^2 \cdot \left\{ [\cos(\varphi_1 - \varphi_2)]^2 \right\}} - \alpha \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (15)$$

Ток задания выражается в относительных единицах (о.е.) как отношение задания мощности A_{ref} и напряжения задания.

Поскольку соединительные кабели в сети предполагаются выбранными правильно, а их параметры – постоянными, колебаниями падения напряжения в линиях при наличии OPEN UPQC можно пренебречь, в том числе и при максимальной нагрузке, когда коэффициент мощности нагрузки составляет 0.9 и она включена в конце линии.

Пределы компенсации, показанные на рис.8 и 9, которые позволяют поддерживать напряжение VPCC на уровне номинального значения, были получены при вышеприведенных предположениях и максимальном напряжении, вносимом последовательным ФКУ, равном 0.6 о.е.

Нижеприведенные результаты для предлагаемого технического решения были получены путем преобразования векторных диаграмм на рис.4 в «геометрические» уравнения.

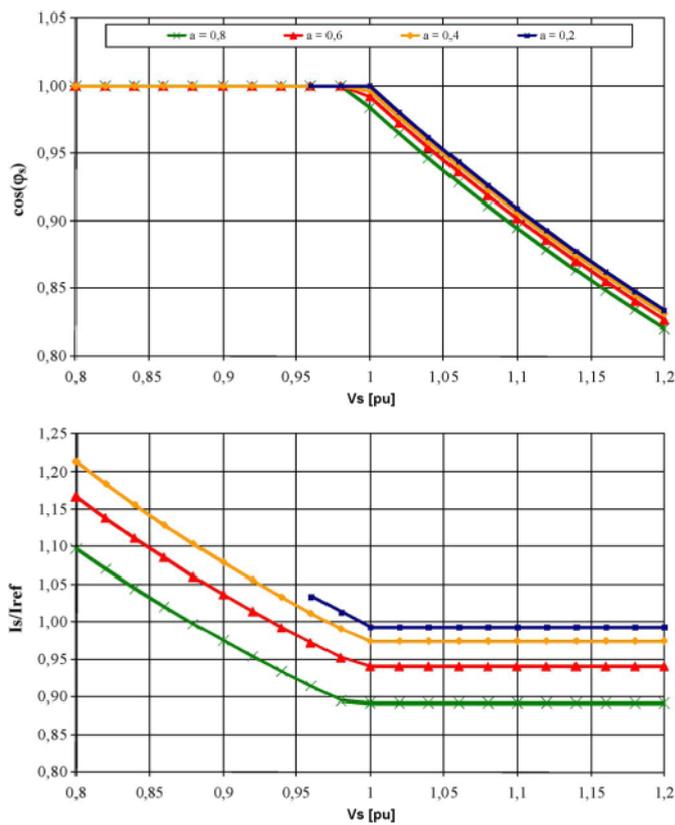


Рис. 10. Коэффициенты мощности в системе и максимальные токи в ЛЭП для случая 2 при различных значениях α . Максимальное напряжение, вносимое последовательным ФКУ составляет 0.6 о.е.

Далее, максимальная реактивная мощность Q_b , генерируемая параллельными ФКУ, может достигать кажущейся мощности $\pm A_{U1}$.

В этом случае, если алгоритм управления обеспечивает поддержание V_{PCC} на уровне номинального значения, будут справедливы следующие соотношения:

$$\cos(\varphi_s) = \frac{V_{PCC}}{V_s} \cdot \cos(\varphi_{PCC}) \quad (16)$$

$$\frac{I_s}{I_{ref}} = \left[\left(\alpha \cdot \cos(\varphi_1) + \frac{A_{U2}}{A_{ref}} \cdot \cos(\varphi_2) \right)^2 + \left(\alpha \cdot \sin(\varphi_1) + Q_b + \frac{A_{U2}}{A_{ref}} \cdot \sin(\varphi_2) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Пределы компенсации, определяемые (16) и (17) получены из (3) и (15).

Из приведенных формул и рисунков следует, что:

- 1) OPEN UPQC хорошо подходит для случаев с низким коэффициентом мощности нагрузки U_2 . На рис. 9 показан диапазон компенсации, который может быть получен путем обмена чисто реактивной мощностью при коэффициенте мощности нагрузки U_2 , равном 0.8. В этом случае OPEN UPQC обеспечивает отличную стабилизацию напряжения, особенно при $\alpha > 0.4$;
- 2) OPEN UPQC не очень подходит для случаев с высоким коэффициентом мощности U_2 . На рис.10 показан диапазон компенсации, который может быть получен путем обмена чисто реактивной мощностью при коэффициенте мощности нагрузки U_2 , равном 1. В этом случае OPEN UPQC не обеспечивает эффективной стабилизации напряжения из-за слишком узкого рабочего диапазона. При нормальном рабочем режиме стабилизация может быть обеспечена (между 0.9 и 1.1 о.е.) только при больших α .

ТАБЛИЦА III

ЗАВИСИМОСТЬ ДИАПАЗОНОВ КОМПЕНСАЦИИ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ И МИНИМАЛЬНОМУ НАПРЯЖЕНИЮ ОТ МАКСИМАЛЬНОЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, КОТОРУЮ МОЖЕТ ВЫДАТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ФКУ, БЕЗ УЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ СЕТИ

$\cos(\varphi_{U1})$	A	$V_{сету\ min}$	$V_{сету\ max}$
$\cos(\varphi_{U2})=0.9$			
0.8-1	≥ 0.2	< 0.86	> 1.40
$c < w(\varphi_{U2})=0.95$			
0.8-1	≥ 0.2	< 0.9	> 1.37
$\cos(\varphi_{U2})=1$			
0.8	0.2	0.9518	1.3146
	≥ 0.3	< 0.9	> 1.37
0.9	0.2	0.9609	1.3009
	0.3	0.9172	1.3558
	≥ 0.4	< 0.84	> 1.40
1	0.2	0.9806	1.2631
	0.3	0.9578	1.3057
	0.4	0.9285	1.3438
	≥ 0.5	< 0.89	> 1.38

Зная максимальное значение тока I_s , из рис.9 и 10 можно оценить мощность последовательного ФКУ. Указанная величина равна произведению максимального вводимого напряжения (равного 0.6 о.е.) и максимального тока ЛЭП (равного 1.1 о.е. при $\alpha = 0.8$ и $V_s = 0.9$ о.е. как показано на рис. 9). Соответственно при небольшом запасе по мощности последовательного ФКУ обеспечивается хорошая стабилизация напряжения в сети. Обычные условия работы представляют собой интересный случай, когда коэффициент мощности U_2 лежит между 0.9 и 1, а напряжение сети находится в пределах, установленных стандартом (*нормальные условия работы*). Для оценки стоимости электроэнергии, связанной с рассматриваемым решением, следует оценить потери в сети.

При таких условиях всегда возможно компенсировать напряжение V_s без учета коэффициента мощности в точке S, если $\alpha \geq 0.5$, как показано в таблице III.

В случае меньшего количества параллельных ФКУ ($\alpha = 0.2$) можно всегда обеспечить компенсацию для напряжения V_s путем уменьшения коэффициента мощности в точке S. Однако коэффициент мощности $\cos(\varphi_s)$ всегда выше 0.8. При коэффициенте мощности нагрузки U_2 , равном 1, коэффициент мощности в точке S всегда равен 1, и можно получить указанные выше пределы компенсации.

Если ставится задача поддерживать коэффициент мощности между 0.9 и 1, предельные напряжения в таблице III изменяются до приведенных в таблице IV.

VI. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ

Для оценки затрат на повышение качества электроэнергии и экономической целесообразности предлагаемого решения был проведен анализ распределительной сети на мощность 400 кВА.

При этом предполагалось, что линия L_1 представляет собой эквивалентную линию, объединяющую все критичные нагрузки U_1 , образующие OPEN UPQC (имеются в виду параллельные ФКУ на их входах. – прим. перев.), а линия L_2 – эквивалентную линию, питающую некритичные нагрузки U_2 . Таким образом, каждая нагрузка, принадлежащая "множеству" U_2 , нуждается в защите от перебоев в питании и флуктуаций напряжения, а каждая нагрузка, принадлежащая к U_1 требует лишь повышения качества электроэнергии до обычных требований.

ТАБЛИЦА IV

ЗАВИСИМОСТЬ ДИАПАЗОНОВ КОМПЕНСАЦИИ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ И МИНИМАЛЬНОМУ НАПРЯЖЕНИЮ ОТ МАКСИМАЛЬНОЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, КОТОРУЮ МОЖЕТ ВЫДАТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ФКУ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПОДДЕРЖАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ СЕТИ МЕЖДУ 0.9 И 1.0 (ОГРАНИЧЕНИЕ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНИИ)

$\cos(\varphi_{U1})$	A	$V_{сету\ min}$	$V_{сету\ max}$
$\cos(\varphi_{U2})=0.9$			
0.8-1	≥ 0.2	< 0.86	> 1.06
$c < w(\varphi_{U2})=0.95$			
0.8-0.9	≥ 0.2	< 0.87	> 1.09
1	0.2	0.9059	1.1095
	≥ 0.3	< 0.88	> 1.11
$\cos(\varphi_{U2})=1$			
0.8	0.2	0.9518	1.1111
	> 0.3	< 0.9	> 1.11
0.9	0.2	0.9609	1.1111
	0.3	0.9172	1.1111
	≥ 0.4	< 0.86	> 1.11
1	0.2	0.9806	1.1111
	0.3	0.9578	1.1111
	0.4	0.9285	1.1111
	≥ 0.5	< 0.89	> 1.11

Компенсация на каждой из нагрузок U_1 возможна несколькими путями. Ниже рассмотрено только два возможных решения. Первое решение предполагает установку ИБП у каждого конечного потребителя, а второе – установку параллельного ФКУ для каждой нагрузки.

Вместо этого для повышения качества электроэнергии на всех нагрузках можно произвести полную перестройку вторичной распределительной сети для повышения тока короткого замыкания в точке подключения нагрузки или же установить последовательное ФКУ на понижающей подстанции. Поэтому были рассмотрены три различных способа повышения качества электроэнергии:

- Установка ИБП у каждого конечного потребителя. В этом случае повысить качество работы распределительной сети невозможно. Зато возможно компенсировать все артефакты подаваемого напряжения для конечных потребителей;
- Перепрокладка всех низковольтных кабельных ЛЭП. В этом случае невозможно устранить все артефакты подаваемого напряжения;
- Установка OPEN UPQC. В этом случае возможна компенсация подавляющего большинства артефактов напряжения.

Последний вариант предполагает установку последовательного ФКУ с мощностью, составляющей 66% от суммарной мощности питаемых нагрузок, а также параллельных ФКУ с предполагаемой мощностью 5 кВт на каждое устройство. Предполагается, что каждый ИБП имеет аналогичную мощность, и входной каскад ИБП представляет собой выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности.

Следует отметить, что стоимость накопителей для ИБП и OPEN UPQC в приведенном анализе не учитывается, т.к. она определяется преимущественно используемыми технологиями и особенностями организации работ. Стоимость перепрокладки кабелей приводится в экономическом анализе, даваемом в [17].

Полная стоимость для каждого решения приведена на рис.11. Приведенные графики учитывают только стоимость установок и материалов, стоимость монтажа предполагается равной 50% стоимости установки.

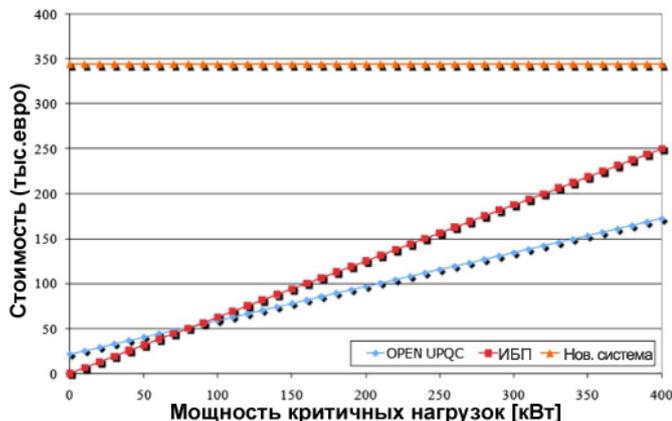


Рис. 11. Сравнение стоимости установки новых ЛЭП, OPEN UPQC и UPS в зависимости от мощности критических нагрузок, нуждающихся в компенсации.

Из рис. 11 можно видеть, что с точки зрения компенсации большинства возмущений в сети в целом, даже установка только последовательного ФКУ уже лучше, чем перепрокладка всех ЛЭП. Для защиты нагрузок U_1 необходимо установить вблизи от них ИБП или параллельное ФКУ, что приводит к возрастанию затрат пропорционально их мощности.

Из рис. 11 можно сделать вывод, что применение ИБП является хорошим решением только при наличии ограниченного количества критических нагрузок. Однако если требуется повысить качество электроэнергии во всей сети, такое решение становится слишком дорогостоящим. Оно может быть более удобным чем предлагаемый OPEN UPQC, если суммарная мощность критических нагрузок не превышает 80 кВА (20% полной нагрузки), причем только в тех случаях, когда не требуется повышение качества электроэнергии во всей сети.

VII. Выводы

Система OPEN UPQC является хорошим средством компенсации, если требуется установка большого количества параллельных ФКУ. Рост доли защищаемых (критических) нагрузок α увеличивает диапазон стабилизации напряжения, в котором OPEN UPQC обеспечивает повышение качества электроэнергии, особенно если нагрузка U_2 имеет высокий коэффициент мощности. Если коэффициент мощности нагрузки U_2 меньше 1, коэффициент мощности в точке S увеличивается, что приводит к снижению потребления реактивной мощности из сети.

При низких значениях параметра α OPEN UPQC при малом количестве параллельных ФКУ становится дорогим. В этом случае лучше использовать другие устройства компенсации (ИБП, UPQC и т.п.) вблизи критических нагрузок и при необходимости неактивную систему компенсации вблизи малочувствительных нагрузок.

Можно сделать вывод, что установка последовательного ФКУ является экономически выгодным для дистрибьюторов электроэнергии способом повышения ее качества в распределительных сетях для достижения соответствия стандартам, изданным соответствующими органами. Улучшение качества компенсации для критических потребителей U_1 может быть достигнуто путем установки вблизи этих потребителей параллельных ФКУ вместо более дорогостоящих ИБП. Условия работы OPEN UPQC сведены в таблицу V.

В настоящее время работы по OPEN UPQC продолжаются. Было исследовано поведение системы при переходных процессах с учетом переключения режимов работы. Был разработан опытный образец мощностью 5 кВт; полученные на нем экспериментальные данные приведены в [18]. Как можно видеть из рис. 11, для получения законченного решения требуются значительные инвестиции, а также наличие условий для проведения испытаний в реальных условиях эксплуатации.

ТАБЛИЦА V
ДЕЙСТВИЯ OPEN UPQC ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ

Напряжение	Действие OPEN UPQC		Нагрузка
	Последовательное ФКУ	Параллельное ФКУ	
Отключение $V_s < 0.01V_n$	Нет реакции	Ввод P_b и Q_b	U_1 - питание U_2 - отключение
Глубокие просадки напряжения $0.01V_n \leq V_s < 0.4V_n$	Нет реакции	Ввод P_b и Q_b	U_1 - питание U_2 - отключение
Просадки напряжения $0.4V_n \leq V_s \leq 0.9V_n$	Ввод P_x^1 и Q_x	Ввод Q_b	U_1 - питание U_2 - питание
Флуктуации напряжения $0.9V_n \leq V_s \leq 1.1V_n$	Ввод Q_x	Ввод Q_b	U_1 - питание U_2 - питание

¹ возможно при необходимости и на ограниченное время.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания, которые помогли улучшить данную статью.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. M. Divan, W. E. Brumsickle, G. A. Luckjiff, J. W. Freeborg and R. L. Hayes, «Реализация национального проекта по мониторингу качества электроэнергии и надежности энергосистемы», 2003. Доступно по адресу: <http://www.softswitch.com/docs/Realizing%20a%20Nationwide%20System%202003.pdf>
- [2] J. M. Guerrero, L. Garcia de Vicuna и J. Uceda, «Источники бесперебойного питания обеспечивают защиту нагрузок», Тезисы IEEE по промышленной электронике, том.1, №1, сс. 28-38, весна, 2007.
- [3] B. Wang, G. Venkataramanan и M. Illindala, «Принцип действия и алгоритм управления динамическим компенсатором провалов (DVR), имеющим трансформатор и преобразователи на базе H-мостов», Тезисы IEEE по промышленной электронике, том.21, №4, сс. 1053-1061, июнь 2006.
- [4] D. M. Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon и S. S. Choi, «Новая технология компенсации просадок напряжения в многолинейных распределительных системах – межлинейный динамический компенсатор провалов напряжения», Тезисы IEEE по промышленной электронике, том 53, № 5, сс. 1603-1611, окт. 2006.
- [5] С. N. M. Но и Н. S. H. Chung, «Управление однофазным динамическим компенсатором провалов напряжения (DVR) без внешнего источника постоянного тока в переходных режимах», Тезисы к 37-й конференции специалистов IEEE по силовой электронике, Jeju, Korea, 18-22 июня, 2006, сс. 2105-2111.
- [6] M. R. Banaei, S. H. Hosseini и M. D. Khajee, «Устранение просадок напряжения с использованием динамического компенсатора просадок с использованием адаптивной нейронной сети», Тезисы к 5-й международной конференции по силовой электронике и управлению движением, Шанхай, Китай, 14-16 авг., 2006, том 2, сс. 1-5.
- [7] A. Ghosh и G. Ledwich, «Компенсация в распределительных сетях с использованием DVR», Тезисы IEEE по электроснабжению, том 17, № 4, сс. 1030-1036, окт. 2002.
- [8] M. K. Mishra, K. Karthikeyan и P. K. Linash, «Разработка и испытание DSTATCOM на основе DSP для компенсации несимметричных и нелинейных нагрузок», представлено на конференции IEEE по электроэнергии в Индии, New Delhi, India, 10-12 апр., 2006.
- [9] B. Singh, A. Adya, A. P. Mittal, и J. R. P. Gupta, «Анализ, моделирование и управление DSTATCOM в трехфазных четырехпроводных изолированных распределительных сетях», представлено на конференции IEEE по электроэнергии в Индии, New Delhi, India, 10-12 апр., 2006.
- [10] A. Ghosh и R. Gupta, «Анализ скользящего метода управления инвертором, используемым в установке DSTATCOM, с помощью частотных характеристик», Тезисы IEEE по электрическим цепям, том 53, № 3, сс. 662-676, март 2006.
- [11] G. Jianjun, X. Dianguo, L. Hankui и G. Maozhong, «Унифицированный кондиционер электроэнергии (UPQC): принцип действия, алгоритм управления и применение», Тезисы конференции по преобразованию энергии (PCC), Osaka, Japan, 2002, том 1, сс. 80-85.
- [12] R. Faranda, E. Tironi, I. Valade и D. Zaninelli, «Улучшение качества электроэнергии с помощью управляемого последовательного реактора и параллельного кондиционера электроэнергии», Тезисы к симпозиуму и выставке «Электротехника на рубеже тысячелетий», Capri, Italy, 12-18 мая, 2000.
- [13] M. Brenna, R. Faranda и E. Tironi, «OPEN UPQC обеспечивает повышение качества электроэнергии в сетях и нагрузках», Тезисы между. Конгресса по распределению электроэнергии, Buenos Aires, Argentina, 27-29 ноября, 2006.

- [14] M. Buschmann, G. Linhofer, P. Maibach и O. Suter, «Применение инвертора напряжения для повышения качества электроэнергии», *Тезисы Азиатско-Тихоокеанского семинара по качеству электроэнергии*, Putrajaya, Malaysia, 28-31 марта, 2005.
- [15] F. Blaabjerg, M. Newman, H. Nielsen и J. G. Nielsen, «Алгоритм управления и экспериментальное изучение динамического компенсатора провалов напряжения (DVR) среднего напряжения», *Тезисы IEEE по силовой электронике*, том 19, № 3, сс. 806-813, май 2004.
- [16] K. N. Choma и M. Etezadi-Amoli, «Применение DSTATCOM на промышленном предприятии», *Тезисы зимней конференции общества электротехники IEEE*, 27-31 янв., 2002, том 2, сс. 725-728.
- [17] A. Agustoni, E. Borioli, M. Brenna, G. Simioli, E. Tironi и G. Ubezio, «Низковольтная распределительная сеть постоянного тока с распределенными источниками питания: анализ возможных архитектур», представлена на 18-й международной конференции по электропитанию CIRED 2005, Turin, Italy, 6-9 июня, 2005.
- [18] R. Faranda, F. Castelli Dezza, I. Mazzucco, P. Redi и E. Tironi, «Согласующий преобразователь для накопителя энергии, позволяющий повысить качества питания нагрузки», представлена на конференции IEEE по электротехнике, Montreal, QC, Canada, 18-22 июня, 2006.

Morris Brenna (M'06) получил степени магистра и доктора философии по направлению «электротехника» в политехническом институте Милана (Италия) в 1999 и 2003 гг соответственно.

В настоящее время является доцентом департамента энергетики политехнического института Милана. В его область интересов входит силовая электроника, распределенное генерирование энергии, тяговый электропривод и электромагнитная совместимость.

Dr. Brenna является членом Итальянской ассоциации электротехники (AEIT) и Итальянской ассоциации инженеров железных дорог (CIFI).

Roberto Faranda (M'06) получил степень доктора философии по направлению «электротехника» в политехническом институте Милана (Италия) в 1998.

В настоящее время является доцентом департамента энергетики политехнического института Милана. В его область интересов входит силовая электроника, гармоника в электрических сетях, качество электроэнергии, анализ энергосистем и распределенное генерирование электроэнергии.

Dr. Faranda является членом Итальянского бюро стандартов (CEI), Итальянской ассоциации электротехники (AEI), группы по электроэнергетике Итальянского национального совета по научным исследованиям (CNR).

Enrico Tironi получил степень магистра по направлению «электротехника» в политехническом институте Милана (Италия) в 1972.

Затем начал работать в департаменте электротехники политехнического института Милана; является профессором. В его область интересов входит силовая электроника, качество электроэнергии и распределенное генерирование электроэнергии.

Dr. Tironi является членом Итальянского бюро стандартов (CEI), Итальянской ассоциации электротехники (AEI), группы по электроэнергетике Итальянского национального совета по научным исследованиям (CNR).

KIT-161-256-852748-76