
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.06

DOI 10.46960/2658-6754_2022_3_04

**КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА СОПРЯЖЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ
УСТАНОВОК****Г.Б. Онищенко**

ООО «НТЦ «Приводная Техника»

Москва, Россия

e-mail: eapu@mail.ru

А.И. Чивенков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

e-mail: chyvenkov@nntu.ru

И.Г. Крахмалин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

e-mail: fedor@mts-nn.ru

Статья посвящена применению автоматизированных систем регулирования параметров напряжения электрических сетей в условиях распределенной генерации. Ограниченная мощность линий электропередачи в промышленных центрах определяет необходимость введения дополнительных электрогенерирующих установок непосредственно в точках подключения потребителей, зачастую имеющих разнохарактерные выходные параметры. Для интеграции их в единую энергетическую систему необходимо применение систем сопряжения параметров выходных напряжений. Рассмотрены предложения по использованию комплексной системы сопряжения в распределительных сетях напряжением 6,10 кВ. Проанализировано влияние комплексной системы сопряжения на режимы работы электрической сети. Даны рекомендации по интеграции комплексной системы сопряжения в электрической сети.

Ключевые слова: комплексная система сопряжения, параметров напряжений, режимы работы электрической сети, трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения, универсальный преобразователь.

Для цитирования: Онищенко Г.Б., Чивенков А.И., Крахмалин И.Г. Комплексная система сопряжения параметров электрогенерирующих установок // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 3. С. 4-18.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_04

COMPLEX SYSTEM OF COUPLING PARAMETERS OF ELECTRIC GENERATING PLANTS

G.B. Onishchenko

LLC “STC Drive Technique”
Moscow, Russia
e-mail: capu@mail.ru

A.I. Chivenkov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: chyvenkov@nntu.ru

I.G. Krakhmalin

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: fedor@mts-nn.ru

Abstract. The article is devoted to the application of automated systems for regulating voltage parameters of electrical networks in conditions of distributed generation. The limited capacity of power transmission lines in industrial centers determines the need to introduce additional power generating units directly at the connection points of consumers often having different output parameters. To integrate them into a single energy system, it is necessary to use systems for coupling output voltage parameters. The presented materials consider proposals for the use of an integrated interface system in distribution networks with a voltage of 6, 10 kV. The influence of a complex interface system on the operating modes of the electrical network is considered. Recommendations on the integration of a complex interface system in the electrical network are proposed.

Keywords: complex interface system, voltage parameters, electrical network operation modes, transformer-thyristor voltage regulator, universal converter.

For citation: G.B. Onishchenko, A.I. Chivenkov and I.G. Krakhmalin, “Complex system of coupling parameters of electric generating plants”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-18, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_04

1. Введение

В условиях развивающейся инфраструктуры промышленных районов при невозможности модернизации действующих сетей электроснабжения зачастую требуется введение дополнительных источников электроэнергии малой генерации. К ним могут относиться: дизельгенераторы, солнечные и электрохимические преобразователи, ветроэлектростанции, имеющие различные по величине, числу фаз и характеру выходные напряжения.

Применение дополнительных источников питания в распределительных сетях привело к развитию сетей с распределенной генерацией и, как следствие, к использованию устройств сопряжения источников питания с различными параметрами выходного напряжения с целью объединения их в единую энергетическую систему электроснабжения с установленными параметрами.

Представленные материалы посвящены рассмотрению интеграции комплексной системы сопряжения (КСС) в распределительной сети. В комплексной системе сопряжения объединены трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения (ТТРН) и универсальный преобразователь (УП).

II. Материалы и методы

Комплексная система сопряжения объединяет в себе два основных объекта, осуществляющие регулирование параметров качества напряжений электрической сети.

Первый объект – ТТРН – включает в себя силовой трансформатор с регулировочными обмотками и тиристорное устройство регулирования под напряжением (РПН), выполняющие функцию сопряжения и регулирования переменных напряжений в единой энергетической системе.

Второй объект – универсальный преобразователь – имеет структуру, в которую входят: AC/DC преобразователь; емкостной накопитель промежуточного звена постоянного тока; DC/AC преобразователь (инвертор). DC/AC преобразователь работает либо в режиме инвертора, либо в режиме активного выпрямителя [1]. AC/DC преобразователь обеспечивает работу в трех режимах:

- активный выпрямитель;
- конвертор напряжений;
- инвертор напряжений.

Таким образом, УП позволяет осуществить подключение к входным цепям переменного трехфазного напряжения или постоянного напряжения с широким диапазоном изменения величин напряжений. Выходное напряжение формируется с соблюдением требований ГОСТ 32144-2013. Структура УП с промежуточным звеном постоянного тока обеспечивает:

- симметрирование токов трехфазной сети;
- компенсацию реактивных составляющих токов трехфазной сети;
- компенсацию высших гармонических составляющих (активный фильтр).

ТТРН выполнен с устройством РПН, реализующим способ плавно-дискретного регулирования напряжения с заранее установленными значениями углов переключения тиристорov с регулированием выходного напряжения по линейному закону. Предварительное определение фазовых углов переключения позволяет определить генерируемые высшие гармонические составляющие на стадии проектирования, что упрощает алгоритм управления УП в режиме активного фильтра.

С использованием КСС решаются вопросы интеграции практически любых типов дополнительных источников питания, включая источники с нестабильными параметрами выходного напряжения, в общепромышленной сети электропитания при применении УП, имеющего входные цепи подключения разнохарактерных источников питания.

Введение КСС в сеть электропитания изменяет режимы ее работы: изменение активной и реактивной составляющих мощности узла нагрузки; статические и динамические характеристики узла нагрузки; изменения напряжений. В этом случае КСС выполняет функцию перенастройки параметров под характеристики нагрузки и источника, реализуя местное регулирование и стабилизацию параметров качества питающего напряжения. Как адаптивный электромагнитный элемент КСС воздействует на целый ряд процессов в питающей сети, исследование кооторых является самостоятельным направлением.

III. КСС в распределительной сети как элемент общей системы электроснабжения

На рис. 1а приведено упрощенное отображение КСС, включающей: тиристорный контактор ТК, силовой трансформатор Тр-р, универсальный преобразователь УП.

Промышленная сеть (S_0) обеспечивает питание КСС. Дополнительным может являться любой из возобновляемых источников (S_B), подключенный к входу УП. Основная энергия передается через тиристорный контактор (ТК) РПН и трансформатор на шинную сборку (0,4 кВ), где суммируется с S_B . Возможность реверса потоков мощности по активной и реактивной составляющим схемотехнически обозначена двунаправленными стрелками. По отношению к питающей сети КСС может выступать как потребителем электрической энергии, так и источником в соответствии с соотношением мощностей S_H и S_B .

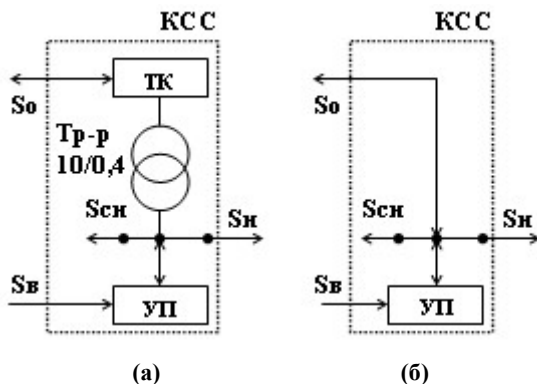


Рис. 1. Варианты применения КСС

Fig. 1. Variants of application of complex coupling system

На рис. 1б (упрощенный вариант) трансформатор и тиристорный контактор исключены. В таком варианте исполнения КСС работает непосредственно в сети 0,4 кВ и при избытке мощности генерации его выдачу электрическим путем обеспечивает ближайший трансформатор. В автономной сети разница между мощностями генерации и потребления накапливается в аккумуляторных батареях (АБ).

Определим различие обозначений КСС:

- с высоковольтным трансформатором КСС_{ВН} по схеме на рис. 1а;
- без трансформатора – КСС_{НН} по схеме на рис. 1б.

Выбор элементов КСС по нагрузке S_n выполняется в предположении, что КСС должен нести полную нагрузку, например, в аварийном режиме или при выполнении планово-предупредительных работ (ППР).

Дополнительно можно отметить особенность КСС_{НН} – возможность согласования потоков мощности систем с различной частотой напряжений.

IV. Подключение КСС в распределительной сети

При интеграции КСС в распределительные сети возможны два варианта:

- установка оборудования новой электрической подстанции (ПС);
- модернизация ПС с уже имеющимся оборудованием.

В первом варианте используется КСС с ТТРН и УП. Во втором варианте существующие трансформаторы используются после установки дополнительного оборудования: тиристорного устройства РПН – на стороне высокого напряжения (ВН); УП – на стороне низкого напряжения (НН). Несомненно, что работа КСС будет влиять на режимы работы сетей, в связи с этим, необходимо определить возможные точки его подключения

в действующих сетях среднего и низкого напряжений. Наиболее благоприятным следует считать применение в распределительных сетях на напряжении 0,4 кВ. Возможна реализация нескольких вариантов подключения: при модернизации существующего оборудования (рис. 2 а,б,в,г); при интеграции новой ПС с комплектным оборудованием КСС (рис. 2д).

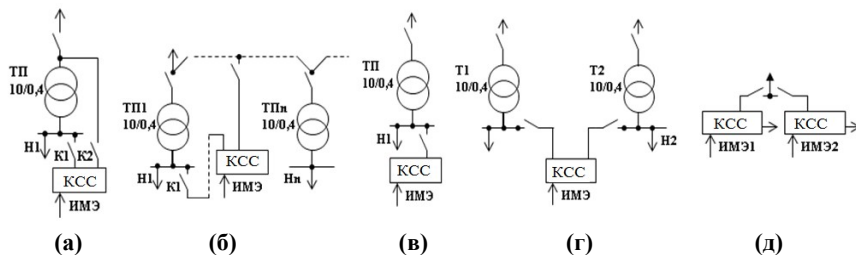


Рис. 2. Подключение КСС в распределительных сетях

Fig. 2. Connection of complex coupling systems in distribution networks

На рис. 2а КСС выполнен по «полной» схеме КСС_{ВН} и работает в параллель с основным трансформатором ПС. КСС выбирается на мощность S_B и в аварийном режиме требуется разгрузка до этого значения. На рис. 2б КСС_{ВН} используется как элемент магистральной схемы для обеспечения питания собственной нагрузки. В случае резервирования устанавливается переключатель на ближайшую ПС. На рис. 2в и 2г представлены варианты подключения КСС_{НН}. Рис. 2г – КСС_{НН} реализует функции автоматического ввода резерва. Рис. 2д – вводимая ПС с КСС_{ВН} или КСС_{НН}, реализующая возможность каскадного наращивания мощности.

Основная задача КСС – объединить разнотипные источники малой генерации в единую сеть с установленными параметрами и обеспечить их функционирование параллельно с основным источником электропитания. КСС реализует возможность расширения функций регулирования параметров качества электрической энергии в питающей сети. Основными критериями здесь являются условия: компенсация потерь реактивной мощности; достижение минимальных потерь активной мощности; повышение пропускной способности линий в сети при заданных ограничениях по допустимой величине отклонений напряжений и рабочей реактивной мощности источников питания.

Рассмотрим варианты использования КСС в распределительной сети. Материал представляет демонстрационный характер, а числовые характеристики – вероятностные показатели.

У. КСС – единственный источник питания

Предположим в качестве основного источника S_0 , дизель-генератор или мини-ГЭС со стабильной во времени генерацией. При необходимости увеличения мощности нагрузки потребуются дополнительный источник электропитания. Очевидно, что введение любого другого дополнительного источника будет в той или иной степени уменьшать нагрузку основного.

В случае установки в качестве дополнительного источника ветрогенератора все его недостатки как нестабильного источника могут отразиться, в том числе, на качестве электроэнергии в точке подключения в силу различных постоянных времени систем регулирования как ветрогенератора, так и самого основного источника. Выход – следует применить КСС, причем, вероятнее всего, КСС_{нн}. Мощность выходных цепей КСС будет определяться нагрузкой S_n .

Ошибочно считать, что располагаемая мощность будет $S_p = K_3 S_0 + S_b$, т.к. значение мощности ветрогенератора S_b во времени не гарантировано, поэтому $S_p = K_3 S_0$. При условии, что коэффициент загрузки основного источника обычно составляет $K_3 = 0,7$, возникает возможность за счет временного повышения K_3 несколько увеличить S_p на небольшую величину, например, на $0,2 S_0$.

Относительно продолжительное уменьшение скорости ветрового потока [2], а, следовательно, и снижение мощности ветрогенератора должны компенсироваться за счет предварительного накопления энергии его штатной аккумуляторной батареей, а при ее недостаточной емкости – дополнительной емкости накопителя промежуточного звена преобразования в составе КСС.

Соответственно можно констатировать, что возможность увеличения мощности потребления нагрузкой обеспечивается не за счет введения дополнительного источника – ветрогенератора, а исключительно за счет нагрузочной способности основного источника. Ветрогенератор представляет из себя временный дополнительный источник $S_b(t)$, позволяющий снизить $K_3(t)$ основного источника до нормальной величины (рис. 3). При снижении величины нагрузки (например, в ночное время) ветрогенератор обеспечивает заряд аккумуляторных батарей.

Алгоритм работы системы управления КСС должен учитывать как непостоянство параметров возобновляемого источника энергии, так и требования к режимам работы нагрузки. При максимальной генерируемой мощности ветрогенератора в рассматриваемом примере можно обеспечить максимальную мощность нагрузки $S_p = 1,1 \cdot S_0$ с K_3 равным 0,9 основного источника.

Если на интервалах времени отсутствия ветрового потока емкости аккумуляторных батарей недостаточно, осуществляется принудительное отключения части нагрузки по заранее установленному графику.

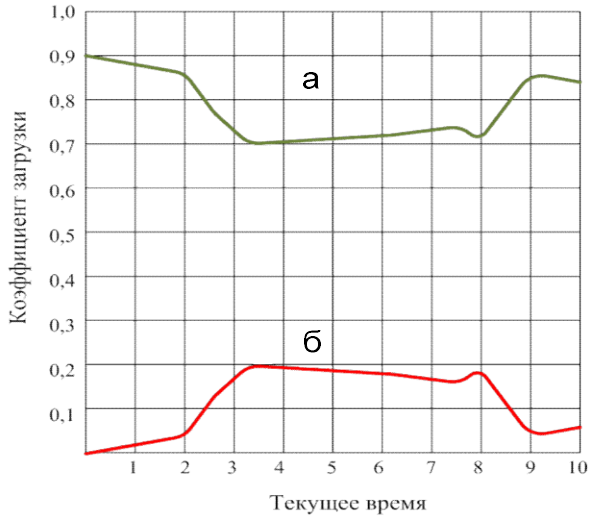


Рис. 3. Относительное изменение коэффициента загрузки Основного источника (а) при генерации дополнительного (б)

Fig. 3. Relative change in the load factor of the main source (a) when generating an additional source (b)

Если средний коэффициент загрузки основного источника составляет половину или более времени, это указывает на то, что мощность ветрогенератора необходимо увеличить, или его местоположение в отношении розы ветров выбрано не совсем удачно.

Следует иметь в виду, что возобновляемые источники будут требовать дополнительной емкости аккумуляторных батарей и приводить к колебаниям мощности потребления основного источника при не нулевой вероятности отключения части нагрузки. Вариант с их применением может использоваться только для соответствующей группы по надежности электроснабжения.

VI. Работа КСС параллельно с сетью

Если основным источником S_0 является питающая сеть, в отношении предыдущего рассмотрения изменится только емкость аккумуляторных батарей КСС. Изменений мощности трансформатора ПС и сечения питающих линий ТП не произойдет.

В случае модернизации существующих сетей возможно применение обоих вариантов: как КСС_{ВН}, так и КСС_{НН}. При этом питающая сеть или основной источник всегда выступают в качестве компенсатора недостающей мощности по отношению к КСС.

В рассматриваемом примере каждый источник питания (и основная сеть, и КСС) должны обеспечить полную нагрузку потребителя, что приводит к избыточности мощности КСС, которая может быть снижена за счет определения очередности разгрузки в аварийных режимах. Результатом являются менее жесткие требования к коэффициенту загрузки основного источника питания (особенно для двух трансформаторных ПС).

VII. Влияние КСС на режим работы сети электропитания

При подключении в одну из точек питающей сети КСС (одинаково для «ВН» и «НН») произойдет изменение параметров ее режима работы. Учитывая, что источники питания распределенной генерации расположены в непосредственной близости от потребителей, можно предположить, что наиболее подходящими будут районные сети электроснабжения.

В случае, когда питание осуществляется по воздушной тупиковой линии 6-10 кВ [3-5] примем для определенности:

- схема замещения линии электропередачи П-образная;
- индексы «к» и «н» обозначают начало и конец линии;
- генерация линии электропередачи учтена поперечными проводимостями $B/2$ без учета активных проводимостей (рассматривается случай отсутствия потерь мощности на корону);
- параметры линии $Z = R + jX$;
- U_1 и U_2 – напряжения в начале и в конце линии;
- $I_{ш1}, I_{ш2}$ – фазные токи в емкостных проводимостях;
- $I_2, S_2 = P_2 + jQ_2, \varphi$ – параметры нагрузки;
- обозначения «а» и «р» – соответствуют активной и реактивной составляющих.

Схема замещения питающей линии и соответствующая векторная диаграмма приведены на рис. 4 а,б.

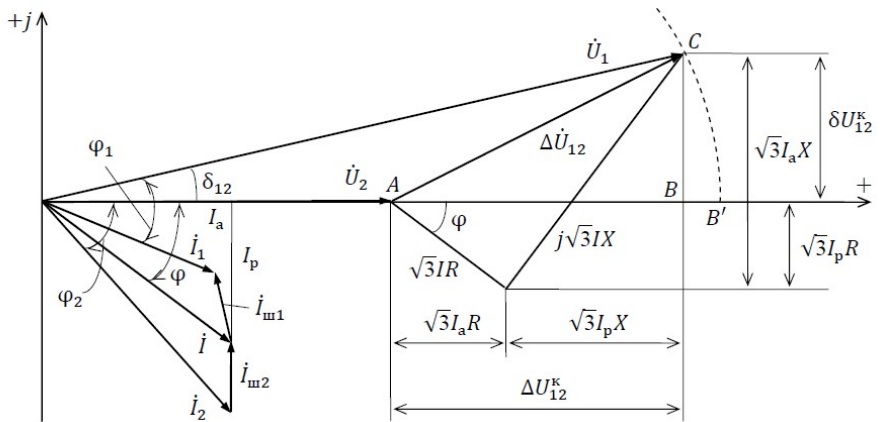
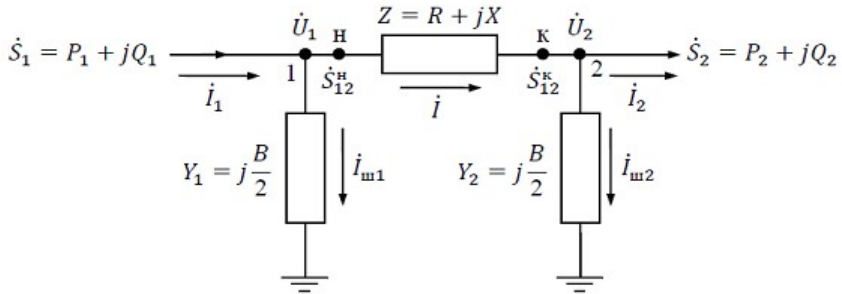


Рис. 4. Схема замещения и векторная диаграмма токов и напряжений

Fig. 4. Equivalent circuit and vector diagram of currents and voltages

На векторной диаграмме:

- ток $I_{м2} = j\sqrt{3}U_2B/6$ опережает вектор U_2 на $\pi/2$;
- ток в линии $I = I_2 + I_{м2}$;
- напряжение в начале линии $U_1 = U_2 + \sqrt{3}I(R + jX)$ или через составляющие тока $U_1 = U_2 + \sqrt{3} [(I_aR + I_pX) + j(I_aX - I_pR)]$;
- $\sqrt{3}(I_aR + I_pX) = \Delta U_{12}^k$ – продольная составляющая падения напряжения, направленная вдоль вектора U_2 ;
- $\sqrt{3}j(I_aX - I_pR) = \delta U_{12}^k$ – поперечная составляющая падения напряжения, направленная перпендикулярно вектору U_2 (отрезки АВ и ВС соответственно).

Если принять угол U_2 равным нулю, то угол U_1 будет δ_{12} :

$$\delta_{12} = \arctg \frac{\delta U_{12}^K}{U_2 + \Delta U_{12}^K};$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12}^K)^2 + (\delta U_{12}^K)^2}.$$
(1)

Ток в начале линии $I_1 = I + I_{ш1}$ и отстает от U_1 на φ_1 , $I_{ш1} = j\sqrt{3}U_1B/6$.
Итоговые значения составляющих потерь через параметры нагрузки:

$$\Delta U_{12}^K = \frac{P_{12}^K R + Q_{12}^K X}{U_2};$$

$$\delta U_{12}^K = \frac{P_{12}^K X - Q_{12}^K R}{U_2}.$$
(2)

Если дополнительно с нагрузкой будет подключен КСС, то нагрузка может меняться как по величине (уменьшение P_2 и Q_2), так и по характеру, вплоть до емкостного, $S_2 = P_2 - P_{КСС} + j(Q_2 - Q_{КСС})$. Это приведет к существенным изменениям составляющих потерь [6–8] и, что очень важно, к изменению величины напряжения на нагрузке. Это показано на рис. 5 для $Q_2 - Q_{КСС} < 0$.

Обратим внимание на поведение векторов и, в частности, \dot{U}_2 при изменении характера нагрузки:

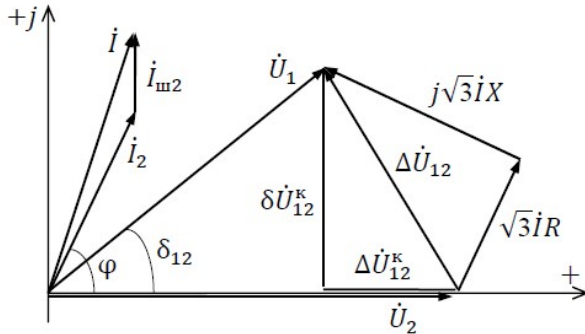


Рис. 5. Векторная диаграмма токов и напряжений при емкостном характере нагрузки

Fig. 5. Vector diagram of currents and voltages with a capacitive load

Этот рисунок наглядно демонстрирует регулирующий эффект КСС $\text{mod}(U_2) > \text{mod}(U_1)$. Похожий эффект возникает при работе линии на холостом ходу. Но, в отличие от него, КСС позволяет регулировать напряжение под нагрузкой, не вызывая при этом переходных процессов.

Можно построить и более подробную векторную диаграмму с учетом составляющих потерь в трансформаторе ПС, от которой питается нагрузка. Но для понимания процессов это была бы излишняя детализация. Аналогично строится диаграмма при любом числе промежуточных отборов мощности вдоль линии (магистральная схема). При этом диаграмма, приведенная на рис. 4, может относиться к любому ее участку (вектор U_1 последующего – это U_2 предыдущего).

VIII. Эффект разделения сети с односторонним питанием

Другой эффект, вносимый КСС в распределение потоков мощности, заключается в искусственном разделении схемы с односторонним питанием, что аналогично введению генерации в произвольном узле [2, 4]. Покажем это на примере простой магистральной схемы питания районных потребителей 0,4 кВ (рис. 6).

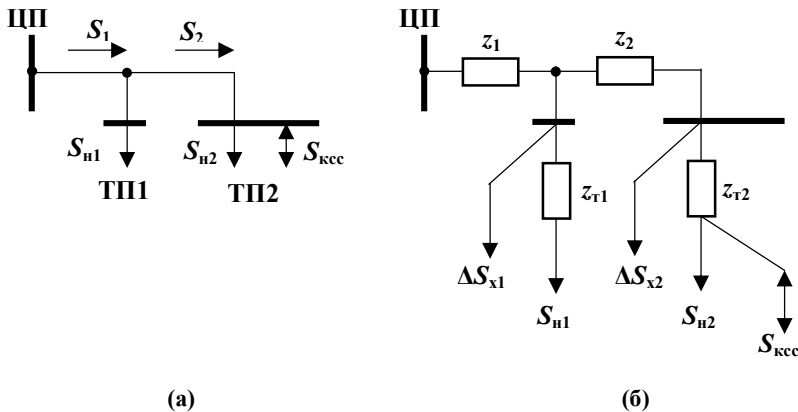


Рис. 6. Районная сеть 6-10 кВ (а) и ее схема замещения (б)

Fig. 6. District network 6-10 kV (a) and its equivalent circuit (b)

К шинам ПС № 2 подключен КСС со своей нагрузкой/генерацией S_{KCC} . ПС однострансформаторные: ΔS_{xi} , z_{mi} соответственно потери холостого хода и сопротивление трансформатора i -ой ПС, Z_i – сопротивление i -го участка сети.

В зависимости от $S_{\text{КСС}}$, схема может трансформироваться в две различные:

- схема с односторонним питанием если $S_{\text{КСС}} \leq S_{\text{н2}} + \Delta S_{\text{т2}}$;
- схема с двухсторонним питанием при $S_{\text{КСС}} > S_{\text{н2}} + \Delta S_{\text{т2}}$.

Генерация $\Delta S = S_{\text{КСС}} - S_{\text{н2}} - \Delta S_{\text{т2}}$ в точке ТП1 приведет к некоторой разгрузке линии между ЦП и ТП1 и увеличению напряжения в точке присоединения ТП1, о чем было сказано выше. Регулирующий эффект зависит от соотношения $\Delta S/S_{\text{н1}}$ и Z_1/Z_2 .

В частном случае он может быть оценен как:

$$\Delta U_{\text{КСС}} = X_2 \cdot Q_{\text{КСС}} / 10U^2 \quad \text{или} \quad \Delta U_{\text{КСС}} = Q_{\text{КСС}} / S_{\text{кз}}, \quad (3)$$

где: $\Delta U_{\text{КСС}}$ – увеличение напряжения в точке подключения КСС; $Q_{\text{КСС}}$ – генерация реактивной мощности; X_2 – суммарное предвключенное сопротивление; $S_{\text{кз}}$ – мощность короткого замыкания в точке подключения. Как видно, оценка $\Delta U_{\text{КСС}}$ ничем не отличается от аналогичной для конденсаторной батареи на стороне ВН.

На стороне НН $\Delta U_{\text{КСС,НН}} = U_{\text{к}} \cdot Q_{\text{КСС}} / S_{\text{ном}}$, где $U_{\text{к}}$ и $S_{\text{ном}}$ – напряжение короткого замыкания и номинальная мощность трансформатора. Потеря напряжения будет уменьшаться, что очевидно. Высвобождается трансформаторная мощность для подключения дополнительной нагрузки. Однако следует иметь в виду, что при аварийном отключении КСС придется отключать и часть нагрузки в соответствии с допустимой перегрузкой трансформатора ПС.

В обоих случаях расчет режима – типовой [9, 10]. Появление генерации в любой точке распределительной сети приводит к перераспределению потоков мощностей и изменению режима напряжения.

IX. Выводы

Поскольку характер генерации реактивной мощности от питающего напряжения за счет КСС может быть произвольным, то регулирующий эффект будет более явно выраженным, а острота вопросов статической устойчивости может быть существенно снижена или исключена вовсе.

В кольцевых сетях эффект будет аналогичным, но более локализованным в силу особенностей расположения ПС в распределительной сети. Это необходимо учитывать до подключения КСС, как и тот факт, что нестабильность во времени генерируемой мощности (например, ветрогенератор) будет трансформироваться в соответствующее изменение режима по напряжению во всей сети.

Даже не проводя отдельного анализа, можно с уверенностью сказать, что влияние КСС на режимы распределительной сети тем сильнее, чем больше мощность источников малой энергетики. Этот очевидный вывод подтверждает тезис о том, что при незначительной мощности КСС (до

5 % от нагрузки ТП) его влиянием на режимные вопросы можно пренебречь. В целом отметим, что подключение КСС практически аналогично либо снижению нагрузки в узле, либо появлению дополнительного источника в сети.

© Онищенко Г.Б., 2022

© Чивенков А.И., 2022

© Крахмалин И.Г., 2022

Поступила в редакцию 23.08.2022

Received 23.08.2022

Библиографический список

- [1] Чивенков А.И., Крахмалин И.Г. Универсальный преобразователь как основа для согласования параметров источников распределенной сети с ВИЭ // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. с. 112-125. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_112
- [2] Стычинский З.А., Воропай Н.И. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. М.: Стройиздат, 2010. – 223 с.
- [3] Идельчик В.И. Электрические системы и сети. 2-е изд. М.: URSS, 2022. – 600 с.
- [4] Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. 2-е изд. М.: URSS, 2022. – 288 с.
- [5] Лыкин А.В. Электрические системы и сети. М.: Юрайт, 2019. – 362 с.
- [6] Гиршин С.С., Владимиров Л.В. Методы расчета и оптимизация режимов электроэнергетических систем. Омск: ОмГТУ, 2010. – 47 с.
- [7] Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
- [8] Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- [9] Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.
- [10] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Юрайт, 2013. – 344 с.

References

- [1] A.I. Chivenkov and I.G. Krakhmalin, “Universal converter as basis for parameters harmonization of distributed networks with renewable energy sources”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 112-125, 2018. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_112
- [2] Z.A. Stychinsky and N.I. Voropai, *Vozobnovlyaemye istochniki energii: Teoreticheskie osnovy, tekhnologii, tekhnicheskie harakteristiki, ekonomika. [Renewable*

- energy sources: Theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*]. Moscow: Stroyizdat, 2010 (in Russian).
- [3] V.I. Idelchik, *Elektricheskie sistemy i seti [Electrical systems and networks]*, 2nd ed. Moscow: URSS, 2022 (in Russian).
- [4] V.I. Idelchik, *Raschety i optimizaciya rezhimov elektricheskikh setej i sistem. [Calculations and optimization of modes of electrical networks and systems]*. 2nd ed. Moscow: URSS, 2022 (in Russian).
- [5] A.V. Lykin, *Elektricheskie sistemy i seti [Electrical systems and networks]*. Moscow: Yurayt, 2019 (in Russian).
- [6] S.S. Girshin and L.V. Vladimirov, *Metody rascheta i optimizaciya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem [Methods of calculation and optimization of modes of electric power systems]*. Omsk: OmSTU, 2010 (in Russian).
- [7] B.I. Kudrin, *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatij [Power supply of industrial enterprises]*. Moscow: Internet Engineering, 2006 (in Russian).
- [8] Y.S. Zhelezko, *Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elek-troenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Electricity losses. Reactive power. The quality of electricity: A guide for practical calculations]*. Moscow: ENAS, 2009 (in Russian).
- [9] Yu.S. Zhelezko, A.V. Artemyev and O.V. Savchenko, *Raschet, analiz i normirovaniye poter' elektroenergii v elektricheskikh setyah: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Calculation, analysis and valuation of losses in electric networks: guidelines for practical calculations]*. Moscow: NTs ENAS, 2004 (in Russian).
- [10] L.A. Bessonov, *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]*. Moscow: Yurayt, 2013 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Онищенко Георгий Борисович, доктор технических наук, профессор, научный консультант ООО НТЦ «Приводная Техника», Москва, Российская Федерация

Georgii B. Onishchenko, D. Sci. (Eng.), professor, scientific consultant LLC “STC Drive Technique”, Moscow, Russian Federation

Чивенков Александр Иванович, доктор технических наук, профессор Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexander I. Chivenkov, Dr. Sci. (Eng), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Крахмалин Игорь Григорьевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород Российская Федерация

Igor G. Krakhmalin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation