

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ МЕЖДУ СЕЧЕНИЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ УСТРОЙСТВАМИ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

*М.Е. Гольдштейн, Н.С. Кононов, А.О. Шульгин*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Максимальная передаваемая по линии электропередачи мощность ограничена допустимой токовой нагрузкой, определяющей нагрев линии. В связи с большой стоимостью строительства новых высоковольтных линий электропередачи возрастает роль повышения пропускной способности существующих линий. Становится экономически выгодным увеличивать передаваемую по линии мощность вплоть до ограничения по нагреву за счет применения различных устройств, в том числе на основе полностью управляемых элементов силовой электроники. К числу таких устройств можно отнести устройства продольной компенсации на основе преобразователя напряжения (УПК-ПН), которые позволяют перераспределять потоки мощности по параллельным сечениям электрической сети, предотвращая загрузку одних из них током выше допустимого и загружая другие. УПК-ПН могут быть выполнены как стационарными так и малогабаритными, что определяет их мобильность. Концепция малогабаритных устройств в последнее время получила активное развитие в России и за рубежом.

На примере 14-узловой тестовой схемы IEEE (модели установившихся режимов частот американской энергосистемы АЕР напряжением 110 кВ и 220 кВ) рассмотрены особенности регулирования её режимов, выполнен анализ нормальных и послеаварийных режимов. Определено, что при отключении одной из линий электропередачи в сети возникает наиболее тяжелый послеаварийный режим, при этом режимные параметры выходят за допустимые пределы по термической стойкости проводов. Показано, что применение малогабаритных УПК-ПН позволяет минимизировать потери в нормальных режимах, а применение стационарных УПК-ПН позволяет разгрузить перегруженные ЛЭП в послеаварийных режимах, не прибегая к усилению существующих и строительству новых ЛЭП.

*Ключевые слова:* гибкие системы электропередачи переменного тока, устройство продольной компенсации, преобразователь напряжения, перераспределение потоков мощности.

### Введение

Для регулирования режимов энергосистем широко применяются элементы силовой электроники, разработаны различные типы устройств управляемых (гибких) систем электропередачи переменного тока (FACTS), применение которых в электрических сетях обеспечивает необходимую степень компенсации реактивной мощности [1–6]. К их числу можно отнести новый класс распределенных управляемых устройств – малогабаритных устройств продольной компенсации, концепция которых была предложена в США [7, 8]. Малогабаритные устройства продольной компенсации (МУПК) – устройства силовой электроники, обеспечивающие управляющее воздействие на реактивную составляющую эквивалентного сопротивления линий электропередачи. Малые габариты устройств определяют их мобильность и возможность использования для устранения локальных демонтажем и переносом на другие объекты [9–11].

Наиболее перспективным вариантом построения МУПК является использование преобразователя напряжения [3]. Высокая стоимость, определяемая применением в ПН транзисторов типа IGBT и тиристоров типа GTO и IGCT, окупается широкими функциональными свойствами ПН, так как они работают во всех четырех квадрантах  $PQ$ -диаграмм мощности, обладают высоким быстродействием и создают напряжение высокого качества. Устройства продольной компенсации на базе преобразователя напряжения (УПК-ПН) позволяют плавно изменять реактивную составляющую эквивалентного сопротивления линий электропередачи, увеличивая или уменьшая ее. Основные эффекты от применения УПК-ПН – это возможность снижения потерь и поддержание нормируемых уровней напряжения в электрической сети, а также перераспределение потоков мощности между параллельными сечениями сети. Управление параметрами УПК осуществляется в режиме реального времени [9–11].

Функциональные возможности, особенности регулирования режимов сети, а также эффект от введения в сеть УПК-ПН рассмотрим на примере района электрической сети, выбрав их размещение в сети и параметры, позволяющие сохранить нормируемые напряжения и токи в наиболее тяжелых послеаварийных режимах. В рабочих режимах рассмотрим возможность снизить потери в сети

путем вариации параметров УПК-ПН, выбранных по условиям послеаварийных режимов.

### Объект исследований и методы

В качестве объекта исследований примем 14-узловую тестовую схему сети IEEE [12], приведенную на рис. 1, и первоначально малогабаритные УПК-ПН [9–11], а при необходимости и ста-

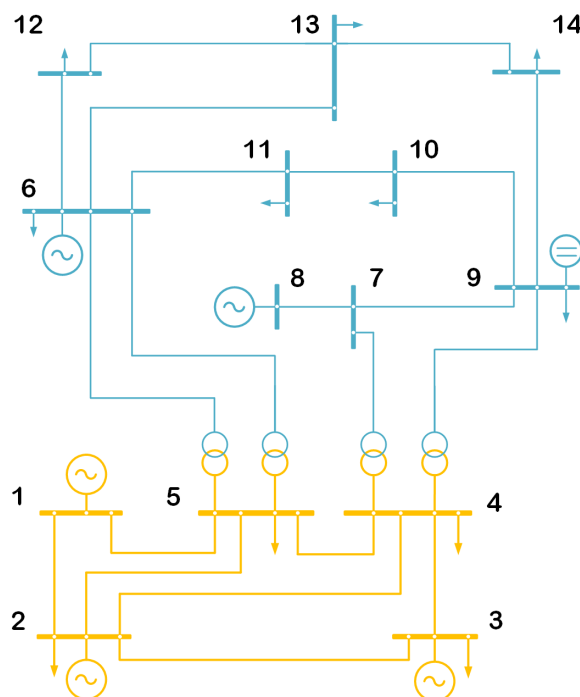


Рис. 1. 14-узловая тестовая схема IEEE исследуемой электрической сети

Параметры ветвей схемы замещения исследуемой сети

Таблица 1

Узел нач.	Узел кон.	$r$ , Ом	$x$ , Ом	$b$ , мкСм	$k_T$	$I_{\text{загр}}$ , %
1	2	10,25	31,30	99,8	–	56,7
1	5	28,58	117,99	93,0	–	39,9
2	3	24,86	104,73	82,8	–	28,8
2	4	30,74	93,27	64,3	–	25,8
2	5	30,13	91,98	65,4	–	24,1
3	4	35,45	90,47	24,2	–	7,3
4	5	7,06	22,28	–	–	21,5
4	7	–	105,81	–	0,511	39,4
4	9	–	276,26	–	0,516	23,0
5	6	–	115,80	–	0,536	44,1
5	6	–	115,80	–	0,536	44,1
6	11	12,56	26,30	–	–	51,3
6	12	16,25	33,83	–	–	25,8
6	13	8,75	17,23	–	–	43,3
7	8	–	23,30	–	–	31,7
7	9	–	14,55	–	–	80,8
9	10	4,21	11,18	–	–	25,5
9	14	16,81	35,76	–	–	20,0
10	11	10,85	25,40	–	–	15,1
12	13	29,22	26,43	–	–	1,4
13	14	22,61	46,03	–	–	23,9

Таблица 2

Нагрузки в узлах схемы замещения исследуемой сети

Узел	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$P_{\text{н}}$ , МВт	$Q_{\text{н}}$ , МВАр	$P_{\text{г}}$ , МВт	$Q_{\text{г}}$ , МВАр
1	230	–	–	304,8	41,5
2	230	21,7	12,7	40,0	43,6
3	230	94,2	19,0	–	25,1
4	230	47,8	–3,9	–	–
5	230	7,6	1,6	–	–
6	115	11,2	7,5	–	12,7
7	115	–	–	–	–
8	115	–	–	–	17,6
9	115	44,2	24,9	–	–
10	115	18,4	7,4	–	–
11	115	18,4	7,4	–	–
12	115	16,0	4,2	–	–
13	115	20,2	8,7	–	–
14	115	22,4	7,5	–	–

ционарные УПК-ПН. Особенность этой сети в том, что она двух классов напряжения 220 кВ (синий цвет) и 110 кВ (желтый цвет), многоконтурная, потоки мощности в контурах направлены в одну сторону. Узлы схемы – это сборные шины электрических станций и подстанций, соединенные линиями электропередачи, представленными на схеме ветвями. Тестовая схема IEEE включает 2 генерирующих и 12 нагрузочных узлов. В узлах 3, 6, 8 установлены регулируемые источники реактивной мощности, в узле 9 – батарея статических конденсаторов.

После проверки адекватности расчетов режимов сети тестовой схемы IEEE в программном комплексе RastrWin параметры ЛЭП тестовой схемы заменены близкими по величине аналогами отечественных линий с типовыми удельными сопротивлениями, а нагрузки в узлах схемы увеличены по сравнению с режимом исходной тестовой схемы до величин, при которых в некоторых из послеаварийных режимов ток ряда ЛЭП превышает допустимое значение. Параметры ветвей схемы замещения исследуемой сети представлены в табл. 1, а нагрузки в узлах – в табл. 2.

Эффективность и возможность применения устройств продольной компенсации на базе преобразователя напряжения оценивалась при помощи математической модели энергосистемы с УПК-ПН, реализованной в программном комплексе RastrWin [13]. Устанавливая УПК-ПН в разные

ветви сети и варьируя их параметры, проводим анализ режима сети, выявляя ветви (ЛЭП) с недопустимыми перегрузками в послеаварийных режимах, а также потери мощности и уровни напряжений в рабочих режимах сети.

#### Анализ послеаварийных режимов

Рассмотрен наиболее тяжелый послеаварийный режим сети – аварийное отключение линии 6-11. В этом случае в сети ток линии 7-9 превышает допустимый (достигает 109 % от допустимого, табл. 3). При этом загрузка параллельных ей линий 5-6 и 4-9, по которым поток мощности идет в том же направлении, что и по ветви 7-9, составляет соответственно всего 35 и 31 %. На рис. 2 изображена карта послеаварийного режима сети при аварийном отключении линии 6-11. Градиентная подсветка ЛЭП на карте режима позволяет визуально оценить загрузку линий по току в процентном соотношении от допустимой загрузки.

Типовым решением является строительство новой или усиление существующей линии электропередачи 7-9. Однако попробуем решить эту задачу, применив УПК-ПН для вытеснения потока мощности, перегружающего линию 7-9 в ветви 5-6 и 4-9. Для этого применим УПК как в сети 110 кВ, так и 220 кВ. Установим их в линиях 1-5, 2-5, примыкающих к узлу 5, и в последовательной к перегруженной ветви линии 4-7. Изменять параметры ветвей, содержащих УПК, будем синхронно.

Таблица 3

Параметры и загрузка линий в послеаварийном режиме

Узел нач.	Узел кон.	$x$ , Ом	$I_{\text{max}}$ , А	$I_{\text{загр}}$ , %
5	6	115,80	94	35,4
4	7	105,81	137	51,6
7	9	14,55	288	108,8
4	9	276,26	82	30,9

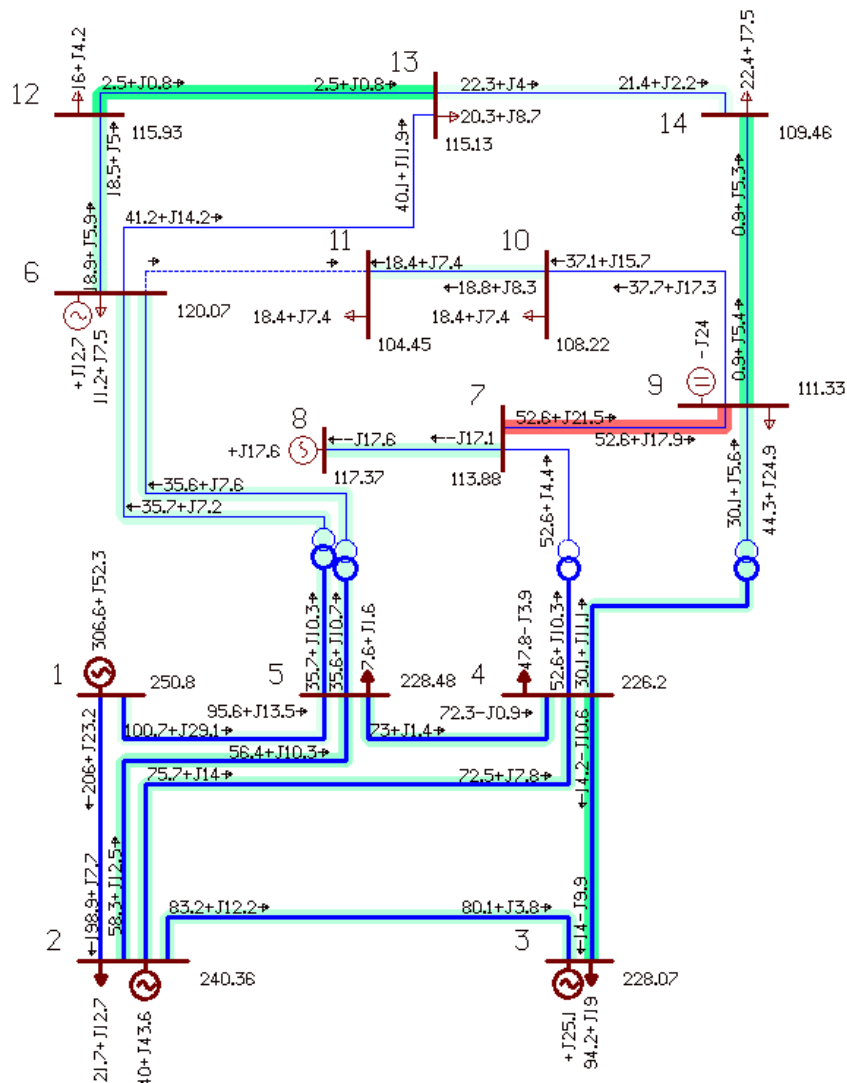


Рис. 2. Карта послеаварийного режима сети

Параметры линий в послеаварийном режиме при применении УПК ПН

Таблица 4

Узел		$x$ , Ом								
Нач.	Кон.	Исх.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	117,99	115,49	112,99	107,99	105,49	102,99	100,49	97,99	92,99
2	5	91,98	89,48	86,98	84,48	81,98	79,48	76,98	74,48	66,98
4	7	105,81	110,81	115,81	120,81	125,81	130,81	135,81	140,81	155,81

Загрузка линий в послеаварийном режиме при применении УПК ПН

Таблица 5

Узел		$I_{\text{загр}}$ , %								
Нач.	Кон.	Исх.	1	2	3	4	5	6	7	8
5	6	35,4	35,6	35,8	35,9	36,1	36,2	36,3	36,4	36,8
7	9	108,8	107,3	106,0	104,5	103,2	101,9	100,7	99,4	96,1
4	9	30,9	31,4	31,8	32,2	32,6	33,1	33,5	33,8	34,9

В табл. 4 и 5 представлены соответственно параметры и загрузки рассматриваемых линий при ряде расчетов послеаварийного режима сети.

Размещение УПК в ветвях 1-5, 2-5 и 4-7 по-

зволило снизить нагрузку линии 7-9 со 109 до 96 % (см. табл. 5), загрузив параллельные ей линии 5-6 и 4-9. Карта послеаварийного режима сети с установленными УПК ПН представлена на рис. 3.

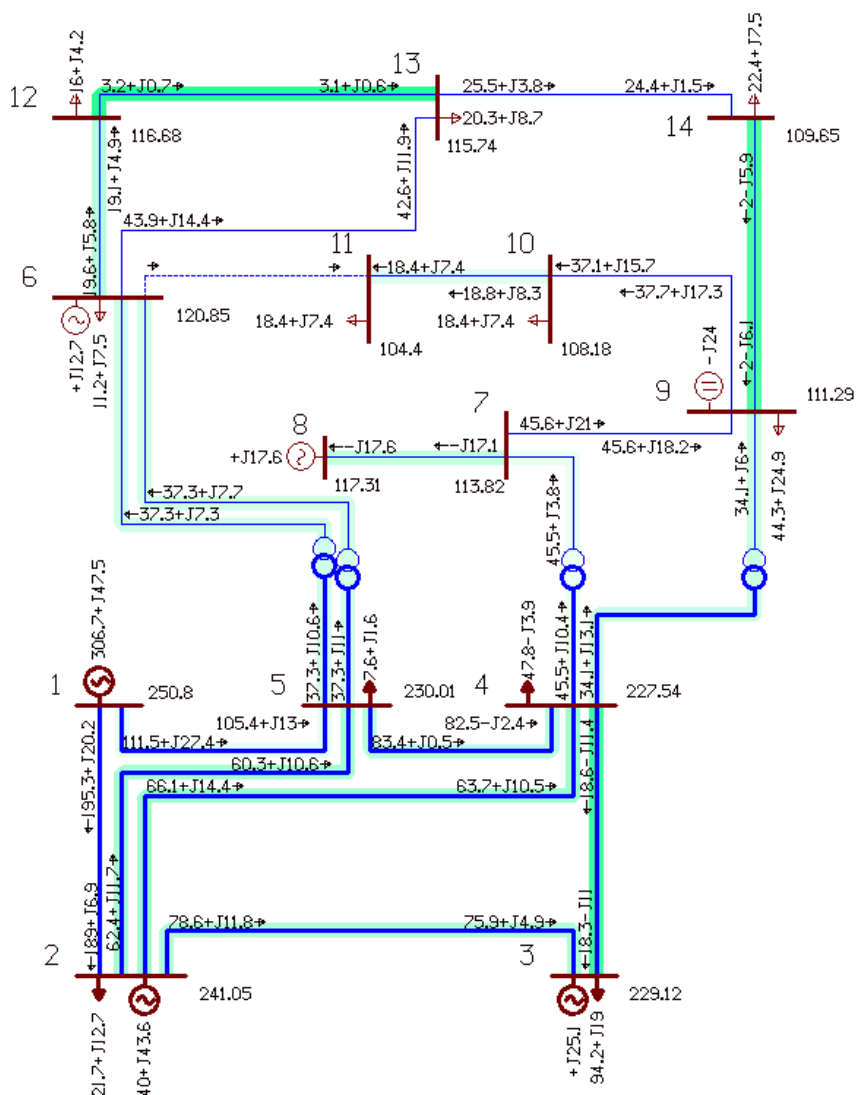


Рис. 3. Карта послеаварийного режима сети при применении УПК ПН

Снижение тока линии 7-9 стало возможным благодаря снижению эквивалентного реактивного сопротивления в ветвях 1-5 и 2-5 соответственно на 21 и 27 %, а также увеличению сопротивления ветви 4-7 на 47 %.

При рассмотренном расположении УПК в исследуемой схеме загрузка по току линий в послеаварийных режимах не превышает допустимую. Установив в сети УПК-ПН с параметрами, обеспечивающими ее работу в наиболее тяжелом послеаварийном режиме, и учитывая возможности регулирования этих параметров, приводящих как к увеличению, так и уменьшению эквивалентных реактивных сопротивлений ЛЭП, выясним, нельзя ли снизить потери в длительных рабочих режимах сети за счет вариации параметров УПК.

#### Оптимизация потерь мощности в нормальном режиме

При анализе нормального режима работы сети, карта которого представлена на рис. 4, рассчи-

таны значения потерь мощности в районах сети с напряжениями 110 и 220 кВ (табл. 6). Потери активной мощности в сети 220 кВ оказались на порядок выше, чем в сети 110 кВ. Поэтому рассмотрим возможности снижения потерь активной мощности в сети 220 кВ, изменяя эквивалентные реактивные сопротивления ЛЭП с помощью УПК-ПН.

Рассматривая в нормальном режиме потоки мощности по ЛЭП 220 кВ, на карте нормального режима сети (см. рис. 4) видим, что в сети 220 кВ потокораспределение резко неравномерное. Часть потока активной мощности, поступающая из балансирующего узла 1 в узел 5, идет сначала по линии 1-2, а затем по линии 2-5. Это увеличивает потери активной мощности в сети 220 кВ. Поэтому, установив УПК-ПН в линии 2-5 и увеличив реактивную составляющую ее эквивалентного сопротивления, попробуем уменьшить потери, вытесняя поступающую из балансирующего узла 1 в узел 5 часть потока активной мощности в линию 1-5.

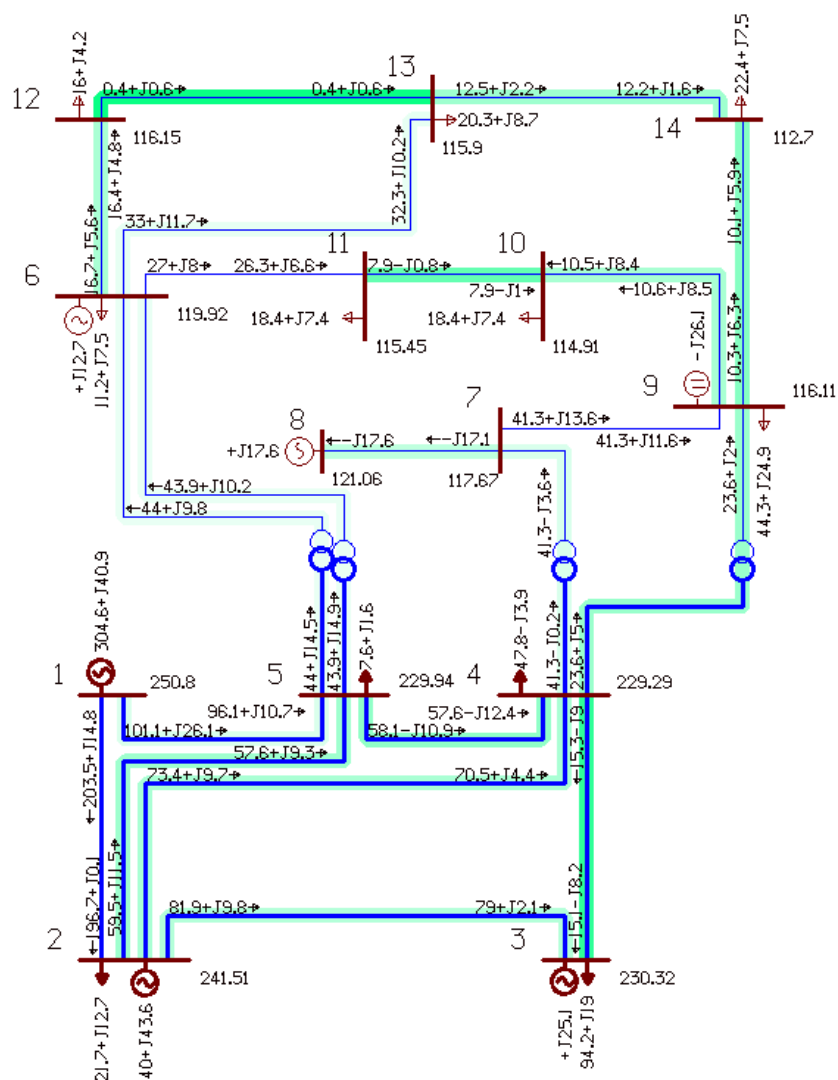


Рис. 4. Карта нормального режима сети

Таблица 6

Потери мощности в нормальном режиме

Класс напряжения	Потери активной мощности $\Delta P$ , МВт	Потери реактивной мощности $\Delta Q$ , МВАр
110 кВ	2,35	7,34
220 кВ	20,26	61,91

УПК на основе ПН позволяет плавно регулировать величину реактивной составляющей эквивалентного сопротивления ЛЭП, поэтому определим оптимальную величину эквивалентного сопротивления ЛЭП 2-5, при которой потери активной мощности в сети будут минимальны. Для этого выполним ряд расчетов нормального режима сети, в которых будем варьировать величину вводимой компенсации, фиксируя при этом потери мощности в сети в районах 110 и 220 кВ и суммарные. Сравним значения потерь мощности в исследуемой схеме в нормальном режиме до и после установки УПК в линии 2-5.

Расчет потерь активной и реактивной мощности также выполним в программном комплексе RastrWin. На рис. 5 представлен график зависимости потерь мощности в сети 110 и 220 кВ в зависимости от соотношения сопротивлений линий 1-5 и 2-5. Нормальному режиму без УПК-ПН соответствует соотношение  $x_{15}/x_{25} = 1,28$ .

Полученная зависимость  $\Delta P_{\Sigma} = f(x_{15}/x_{25})$  принимает минимальное значение 22,11 МВт при соотношении сопротивлений  $x_{15}/x_{25} = 0,85$ , что соответствует увеличению реактивной составляющей эквивалентного сопротивления линии 2-5

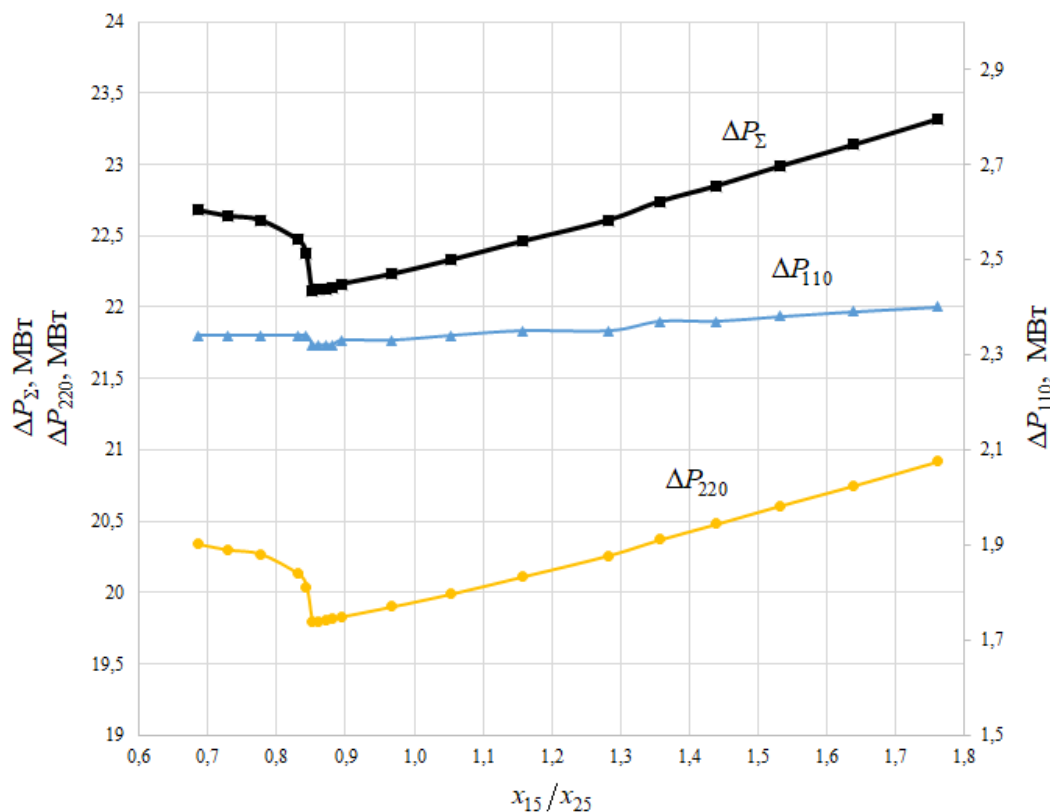


Рис. 5. График зависимости потерь активной мощности от соотношения эквивалентных реактивных сопротивлений линий 1-5 и 2-5

на 50,6 %. Таким образом, получив вышеперечисленные эквивалентные параметры линий с помощью устройств УПК-ПН, удалось перераспределить потоки мощности в сети 220 кВ и снизить суммарные потери активной мощности в нормальном режиме на 2,2 %.

Определив величины эквивалентных сопротивлений УПК, которые пришлось вводить в разных режимах сети, найдем мощность УПК-ПН

$$Q_{\text{УПК}} = \Delta x \cdot I_{\text{max}}^2$$

и величину максимального напряжения, вводимого УПК,

$$\Delta U_{\text{УПК}} = \Delta x \cdot I_{\text{max}}$$

где  $\Delta x$  – наибольшее изменение реактивной составляющей эквивалентного сопротивления ЛЭП,

найденное по условиям послеаварийного режима, Ом;  $I_{\text{max}}$  – ток ЛЭП в режиме с наибольшей ее загрузкой, А.

Результаты расчета сведены в табл. 7 для наиболее тяжелого послеаварийного режима, в табл. 8 – для нормального режима.

Как следует из полученных результатов (см. табл. 7), перераспределение потоков мощности по линиям 220 кВ исследуемой сети в наиболее тяжелом послеаварийном режиме возможно при мощности УПК-ПН в ветви 1-5 не менее 1782,2 кВАр. Следовательно, оно не может быть набрано из малогабаритных УПК [9–11], а должно быть стационарным, а его присоединение выполнено при помощи жесткой ошиновки. В остальных ветвях

Таблица 7

Параметры УПК ПН в наиболее тяжелом послеаварийном режиме

Узел нач.	Узел кон.	$\Delta x$ , Ом	$Q_{\text{УПК}}$ , кВАр	$\Delta U_{\text{УПК}}$ , кВ
1	5	25,0	1782,2	6,68
2	5	25,0	592,9	3,85
4	7	50,0	708,1	5,95

Таблица 8

Параметры УПК ПН в нормальном режиме

Узел нач.	Узел кон.	$\Delta x$ , Ом	$Q_{\text{УПК}}$ , кВАр	$\Delta U_{\text{УПК}}$ , кВ
2	5	46,5	593,8	5,26

УПК-ПН могут быть малогабаритными. Для оптимизации потерь мощности в нормальном режиме достаточны малогабаритные устройства продольной компенсации, которые устанавливаются непосредственно на проводах ЛЭП. Эти устройства обладают меньшими по сравнению с рассчитанными в табл. 7 величинами вводимых в линию реактивных сопротивлений [9–11] и имеют меньшую мощность и габариты. В частности, в рассматриваемой сети в нормальном режиме может быть применено УПК-ПН в ветви 2-5 с параметрами, выбранными по результатам анализа послеаварийных режимов. В некоторых случаях для достижения необходимого эффекта от регулирования эквивалентного сопротивления ЛЭП требуется последовательное соединение нескольких таких устройств.

### Заключение

Выполненные исследования подтвердили, что применение устройств продольной компенсации на базе преобразователей напряжения позволяет, не прибегая к строительству новых линий электропередачи, уменьшить перегрузку ЛЭП в послеаварийных режимах, а также выполнить оптимизацию нормального режима работы электрической сети, что ведет к увеличению энергетической эффективности работы сети в целом. При этом для управления нормальными режимами могут быть применены малогабаритные УПК-ПН, а послеаварийными – стационарные.

### Литература

1. Кочкин, В.И. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах / В.И. Кочкин, Ю.Г. Шакарян. – М.: Торус Пресс, 2011. – 311 с.
2. Кочкин, В.И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП / В.И. Кочкин // Новое в российской электроэнергетике. – 2010. – № 8. – С. 5–16.
3. Кочкин, В.И. Преобразователь напряжения как управляемый элемент электрических сетей / В.И. Кочкин, М.В. Пешков, Д.В. Романенко // Известия НИИПП. – 2004. – № 60. – С. 128–146.
4. Суд, Виджей К. HVDC and FACTS Controllers: Применение статических преобразователей в энергетических системах: пер. с англ. / Виджей К. Суд. – М.: НП «НИИА», 2009. – 344 с.
5. Рыжов, Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учеб. для вузов / Ю.П. Рыжов. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 488 с.
6. Hingorani, N.G. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems / N.G. Hingorani, L. Gyugyi. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p. DOI: 10.1109/MEI.2002.981326
7. Divan, D. Distributed FACTS Devices – A New Concept for Realizing Grid Power Control / D. Divan, H. Johal // IEEE Trans. Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, no. 6. – P. 2253–2260. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909252
8. A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Power Flow Control on Existing Power Lines / D. Divan, W.E. Brumsickle, R.S. Scheider et al. // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22, no. 1. – P. 642–649. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.887103
9. Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи / Д.И. Панфилов, Ю.Г. Шакарян, М.Г. Асташев и др. // Электротехника. – 2017. – № 7 – С. 78–82.
10. Баринов, В.А. Применение в энергосистемах нового класса распределенных сетевых управляемых устройств / В.А. Баринов, А.С. Маневич, А.С. Мурачев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. – № 3. – С. 3–14.
11. Кононов, Н.С. Особенности применения устройств продольной компенсации на базе преобразователя напряжения для управления режимами электрической сети / Н.С. Кононов, А.О. Шульгин, М.Е. Гольдштейн // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы IX Междунар. молодеж. науч.-техн. конф.: в 3 т. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2018. – Т. 3. – С. 93–95.
12. Архив тестовых схем электроэнергетических систем. – <https://labs.ece.uw.edu/pstca/> (дата обращения: 05.01.2019).
13. Программный комплекс «RastrWin»: официальный веб-сайт. – <https://rastrwin.ru/> (дата обращения: 05.01.2019).

**Гольдштейн Михаил Ефимович**, канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [susu-meg@mail.ru](mailto:susu-meg@mail.ru).

**Кононов Николай Сергеевич**, магистрант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [kononov.ns@ya.ru](mailto:kononov.ns@ya.ru).

**Шульгин Алексей Олегович**, магистрант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [shulgin.ao@ya.ru](mailto:shulgin.ao@ya.ru).

*Поступила в редакцию 5 февраля 2019 г.*



## POWER FLOW REDISTRIBUTION BETWEEN POWER GRID SECTIONS BY SERIES COMPENSATORS BASED ON VOLTAGE SOURCE CONVERTERS

M.E. Gol'dshteyn, [susu-meg@mail.ru](mailto:susu-meg@mail.ru),

N.S. Kononov, [kononov.ns@ya.ru](mailto:kononov.ns@ya.ru),

A.O. Shulgin, [shulgin.ao@ya.ru](mailto:shulgin.ao@ya.ru)

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Power transmitted through a power transmission line is limited by the current-carrying capacity, which determines line heating. Increasing the current lines capacity is becoming imperative due to the expensiveness of constructing new PTLs. The most cost-effective solution is to increase the power transmitted through the transmission lines up to the thermal limit by using a variety of devices, which includes fully controlled power electronics. One such device is a series compensator based on voltage source converter (VSC) that can distribute power flows between parallel power grid sections. In particular, it can prevent the one line from being overloaded by redistributing the load to other lines. Series compensators based on VSC can have both stationary and portable design. Smaller devices are increasingly popular in Russia and abroad.

The paper analyzes the specifics of controlling a power grid and dwells upon its normal and post-emergency operation, with evidence sampled from the IEEE 14 Bus Test Case (steady-state models for parts of 110 kV and 220 kV American Electric Power, AEP). It finds that disconnecting a PTL effectively triggers a worst-case post-emergency scenario, whereby the operating parameters go beyond the permitted current limits for the thermal resistance of the conductor. The paper proves portable series compensators capable of minimizing the power losses in normal operation. In turn, stationary series compensators can unload the overloaded PTLs without a need to reinforce the existing PTLs or construct new ones.

*Keywords: flexible AC transmission systems, series compensator, voltage source converter, power flow redistribution.*

### References

1. Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G. *Primeneniye gibkikh (upravlyayemykh) sistem elektroperedachi peremennogo toka v energosistemakh* [Application of Flexible AC Transmission Systems in Power Systems]. Moscow, Torus Press Publ., 2011. 311 p.
2. Kochkin V.I. [New Technologies of Transmission Lines Capacity Improvement]. *Electric Engineering News*, 2010, no. 8, pp. 5–16. (in Russ.)
3. Kochkin V.I., Peshkov M.V., Romanenko D.V. [Voltage Source Converter as the Operated Element of Electrical Grids]. *Izvestiya NIPT* [High Voltage Direct Current Power Transmission Research Institute Proceedings], 2004, no. 60, pp.128–146. (in Russ.)
4. Vijay K. Sood. *HVDC and FACTS Controllers: Applications of Static Converters in Power Systems*. Kluwer Academic Publ., 2009. 344 p.
5. Ryzhov Yu.P. *Dal'niye elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Large-Distance Ultrahigh Voltage Transmissions]. Moscow, Moscow Power Institute Publ., 2007. 488 p.
6. Hingorani N.G., Gyugyi L. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York, IEEE Press, 2000. 432 p.
7. Divan D., Johal H. Distributed FACTS Devices – A New Concept for Realizing Grid Power Control. *IEEE Trans. Power Electronics*, 2007, vol. 22, no. 6, pp. 2253–2260. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909252
8. Divan D., Brumsickle W.E., Schneider R.S., Kranz B., Gascoigne R.W., Bradshaw D.T., Ingram M.R., Grant I.S. A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Power Flow Control on Existing Power Lines. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 642–649. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.887103
9. Panfilov D.I., Shakaryan Yu.G., Astashev M.G., Rashitov P.A., Antonov A.V. [Small devices for series compensation in overhead power lines]. *Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 7, pp. 78–82. (in Russ.)
10. Barinov V.A., Manevich A.S., Murachev A.S. [Application of a New Class of Distributed Network Controlled Devices in Power Systems]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2016, no. 3, pp. 3–14. (in Russ.)
11. Kononov N.S., Shulgin A.O., Goldstein M.E. [Specifics of using series compensators based on voltage source converters to control power grid parameters]. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: mater.*

*IX Mezhdunar. molod. nauch.-tekhn. konf.* [Young Scientists' Views of Power Engineering 2018: Proceedings of the Ninth International Scientific and Technical Conference]. Kazan, Kazan State Power Engineering University, 2018, vol. 3, pp. 93–95. (in Russ.)

12. Power Systems Test Case Archive. Available at: <https://labs.ece.uw.edu/pstca/> (accessed 05.01.2019).

13. RastrWin Software Suit: official website. Available at: <https://rastrwin.ru/> (accessed 05.01.2019).

*Received 5 February 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гольдштейн, М.Е. Перераспределение потоков мощности между сечениями электрической сети устройствами продольной компенсации на основе преобразователей напряжения / М.Е. Гольдштейн, Н.С. Кононов, А.О. Шульгин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 13–22. DOI: 10.14529/power190302

### FOR CITATION

Gol'dshteyn M.E., Kononov N.S., Shulgin A.O. Power Flow Redistribution Between Power Grid Sections by Series Compensators Based on Voltage Source Converters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 13–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190302

---