

ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НОВОГО КЛАССА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЕВЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ

АВТОРЫ:

В.А. БАРИНОВ,
Д.Т.Н.,
ОАО «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. Г.М.
КРЖИЖАНОВСКОГО»
(ОАО «ЭНИН»)

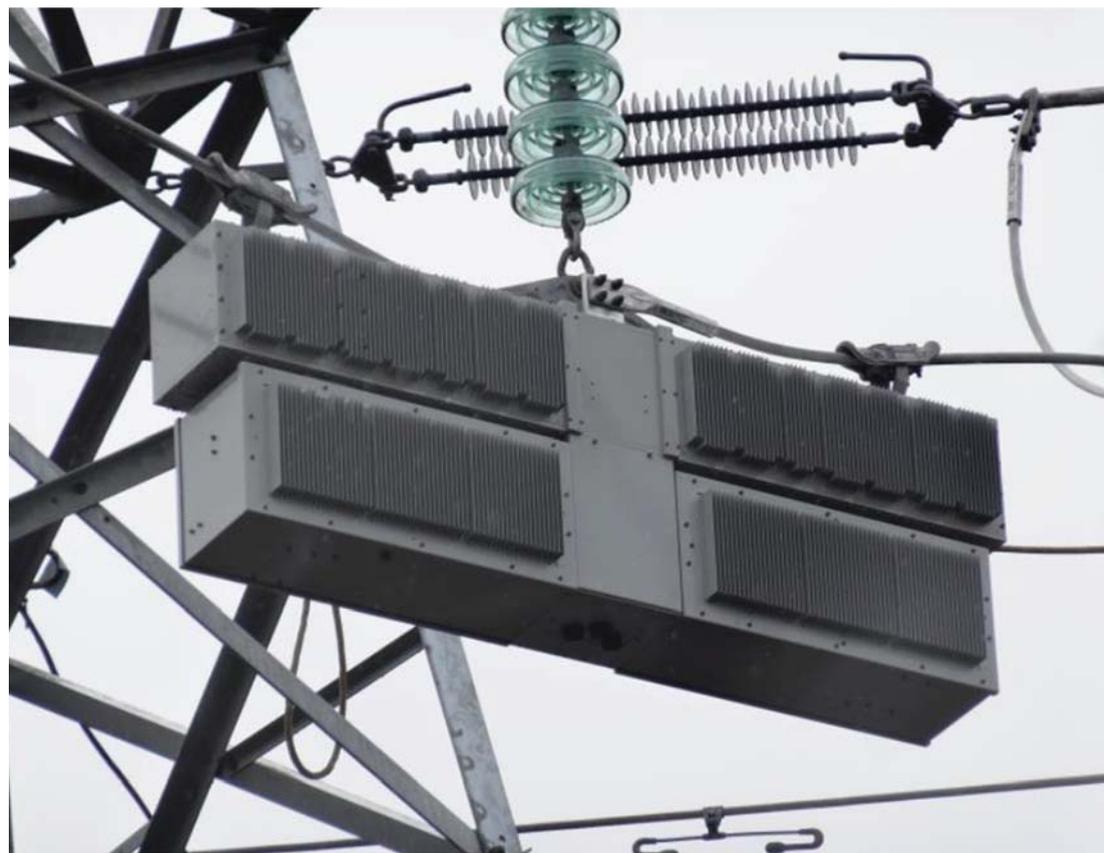
А.С. МАНЕВИЧ,
ОАО «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. Г.М.
КРЖИЖАНОВСКОГО»
(ОАО «ЭНИН»)

А.С. МУРАЧЕВ,
ОАО «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. Г.М.
КРЖИЖАНОВСКОГО»
(ОАО «ЭНИН»)

Основным свойством распределенных сетевых управляемых устройств является возможность изменения параметров ВЛ. Это позволяет существенно снизить вли-

яние неоднородности параметров ВЛ различных классов напряжения на потокораспределение и тем самым уменьшить потери мощности и повысить пропускную способность сети и качество напряжения.

Ключевые слова: энергосистема; распределенные управляемые сетевые устройства; области применения.



Концентрированные статические компенсаторы последовательного включения (TowerRouter — TRU) на опоре ВЛ

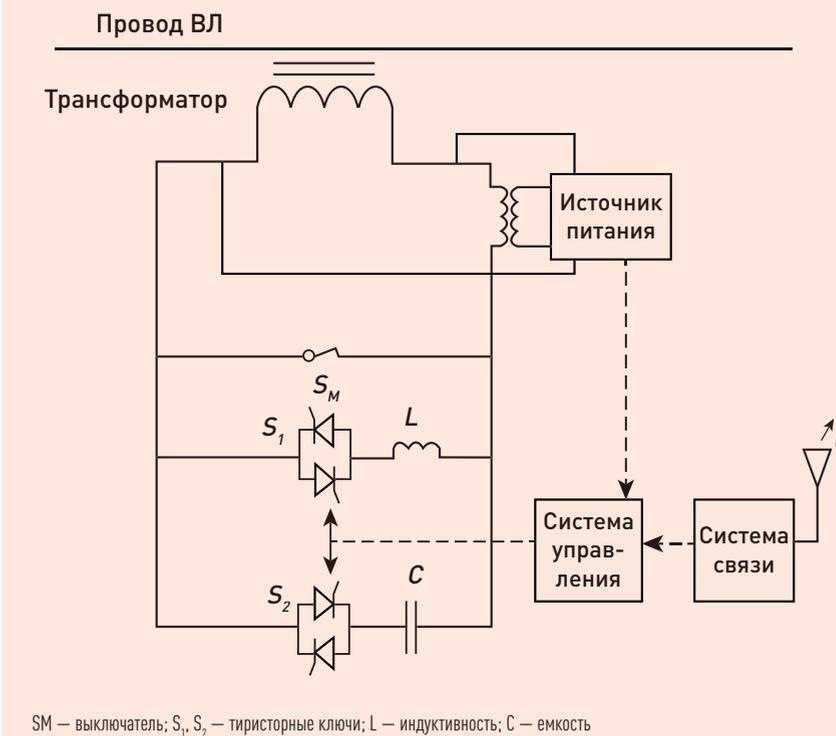
В настоящее время в мире особое внимание уделяется развитию «интеллектуальных» энергосистем. Важным элементом «интеллектуальных» энергосистем являются устройства управляемых (гибких) систем электропередачи переменного тока — Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS). Уже давно разработаны и применяются различные типы устройств FACTS [1].

Новый класс регулируемых устройств FACTS составляют распределенные управляемые сетевые устройства — Distributed FACTS (D-FACTS), или «интеллектуальные» провода, позволяющие изменять индуктивное сопротивление воздушной линии (ВЛ) [2–5]. Устройства D-FACTS делятся на:

- распределенные статические компенсаторы последовательного включения (Distributed Static Series Compensator, DSSC);
- распределенные реакторы последовательного включения (Distributed Series Reactor, DSR);
- распределенные конденсаторы последовательного включения (Distributed Series Capacitor, DSC);
- концентрированные статические компенсаторы последовательного включения (Tower Router, TRU).

На рис. 1 приведена принципиальная схема модуля DSSC [2]. Первичной обмоткой трансформатора является провод ВЛ. Вторичная обмотка трансформатора в нормальном режиме замкнута выключателем SM . В разомкнутом состоянии выключателя SM при включении ключа S_1 в ВЛ вводится индуктивное сопротивление, при включении ключа S_2 — емкостное сопротивление. Степень и характер изменения сопротивления ВЛ зависит от количества установленных на ней модулей DSSC и характера

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА МОДУЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО СТАТИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ



SM — выключатель; S_1, S_2 — тиристорные ключи; L — индуктивность; C — емкость

Рис. 1

их работы. Как показано на рис. 2, исходное индуктивное сопротивление ВЛ может быть увеличено посредством включения N модулей DSSC на величину $N \cdot X_L$ или же уменьшено за счет внесения в нее N модулями DSSC емкостного сопротивления $N \cdot X_C$. При этом в работе могут находиться как все установленные на ВЛ модули DSSC, так и их часть.

Применение в модулях D-FACTS инверторов с широтно-импульсной модуляцией позволяет осуществлять плавное регулирование реактивного сопротивления (рис. 3), вносимого в линию электропере-

дачи, в том числе с изменением характера реактивного сопротивления (с индуктивного на емкостное и наоборот).

Технология распределенных управляемых устройств была предложена профессором Технологического института штата Джорджия (США) D. Divan [2]. В последние годы опубликовано большое число работ, посвященных вопросам применения распределенных управляемых устройств в энергосистемах [см., например, 2–12].

В настоящее время DSR — это коммерчески используемые D-FACTS

ВЕЛИЧИНА ИЗМЕНЕНИЯ РЕАКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА УСТАНОВЛЕННЫХ МОДУЛЕЙ DSSC

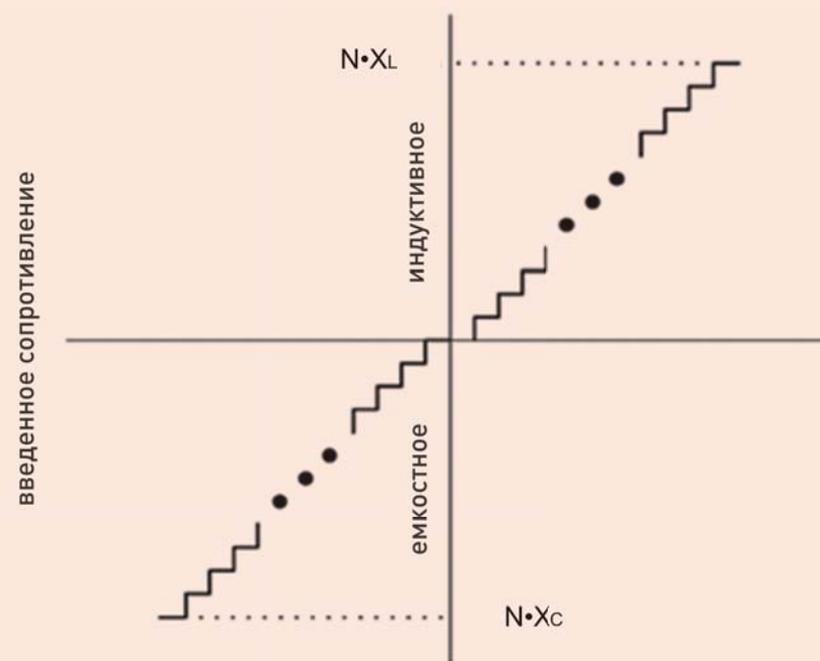


Рис. 2

РАЗНОВИДНОСТИ DSR-МОДУЛЕЙ

Параметры	Model 500-SD4	Model 500-SD5	Model 1000-SD5	Model 1000-LD5
Длительно допустимый ток в ВЛ, А	500	500	1000	1000
Индуктивность, мкГн	85,2	105,7	53,7	44,9
Масса, кг	93	116	116	107
Длина, см	142	167	167	167
Ток КЗ, кА	63			
Срок службы	20 лет и более			

Таблица 1

устройства. Типовой модуль DSR имеет индуктивность 47 мкГн, при частоте 50 Гц он может обеспечить увеличение реактивного сопротивления ВЛ на 0,015 Ом.

В 2012 г. энергокомпанией Tennessee Valley Authority (США) введено в работу 99 модулей DSR на ВЛ напряжением 161 кВ, а в 2013 г. энергокомпанией

Southern Company (США) — 36 модулей DSR на двух ВЛ напряжением 115 кВ [7]. На рис. 4 показано расположение D-FACTS модулей на ВЛ.

В настоящее время разработана линейка коммерчески реализуемых DSR-модулей, характеристики которых приведены в табл. 1 [8].

На рис. 5 приведена принципиальная схема TRU-модуля (внешний вид TRU-модуля показан на фото на стр. 14) — концентрированного статического компенсатора последовательного включения. Установка TRU-модуля также осуществляется без нарушения целостности проводов, а величина вносимого одним таким модулем реактивного сопротивления может достигать ± 2 Ом, что позволяет оказывать большее влияние на индуктивное сопротивление ВЛ, чем при использовании модулей DSR, особенно в случае ее малой длины. В табл. 2 приведена линейка коммерчески реализуемых TRU-модулей [8].

РАСПОЛОЖЕНИЕ TRU-МОДУЛЯ НА ОПОРЕ ВЛ

Преимуществами устройств D-FACTS являются:

- меньшая стоимость и сложность по сравнению с традиционными устройствами FACTS;
- отсутствие затрат на обустройство землеотвода на подстанции;
- установка на проводах ВЛ без нарушения их целостности вблизи опор или на них.

При этом модульное выполнение устройств D-FACTS обеспечивает высокую надежность и небольшое время ввода в действие (например, среднее время установки одного модуля DSR на ВЛ 161 кВ

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА МОДУЛЯ D-FACTS С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ (DC — КОНДЕНСАТОРНАЯ БАТАРЕЯ, ИСТОЧНИК ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ)

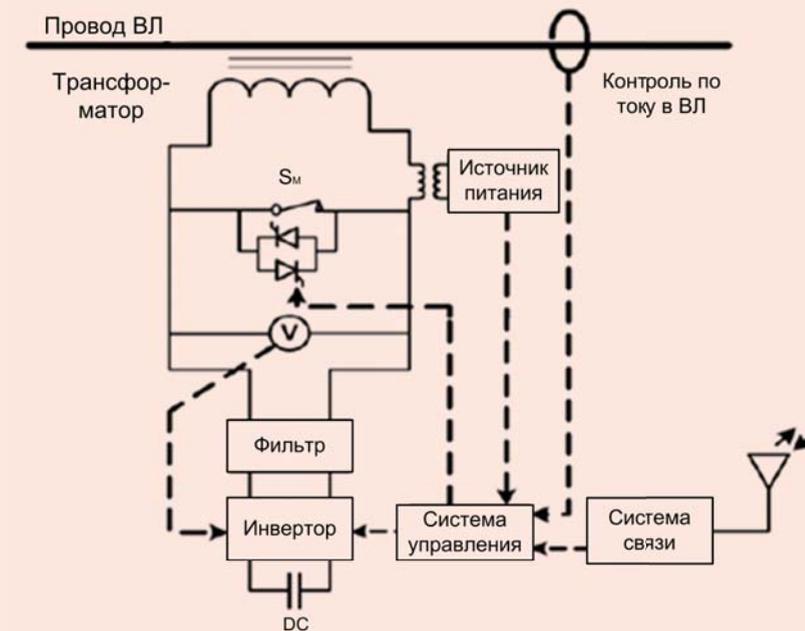


Рис. 3

энергокомпании Tennessee Valley Authority, США, составило примерно 15 мин.). Также модули D-FACTS при необходимости могут быть относительно просто перенесены на другие ВЛ.

В качестве областей применения распределенных управляемых сетевых устройств рассматриваются:

- увеличение эффективности использования существующих сетей;
- управление контурными потоками мощности;
- повышение адаптации энергосистем к подключению электростанций, использующих возобновляемые источники энергии;
- обеспечение возможности задержки или отказа от строительства новых ЛЭП;
- фазовая балансировка;
- повышение статической и динамической устойчивости; снижение риска нарушения устойчивости энергосистемы в виде лавины напряжения;
- повышение способности энергосистемы противостоять аварийным возмущениям.

При этом основным направлением исследований относительно возможности применения D-FACTS в энергосистемах является обоснование применения данного класса устройств для снятия сетевых ограничений в нормальных и послеаварийных режимах путем перераспределения потоков мощности и токовой разгрузки перегруженных ВЛ.

В качестве примера оценки эффективности применения устройств D-FACTS в энергосистемах за рубежом можно указать на два исследования:

1. исследование целесообразности применения устройств D-FACTS в энергосистеме Бразилии, вы-

РАЗНОВИДНОСТИ TRU-МОДУЛЕЙ

Параметры	Model 1000	Model 1500
Длительно допустимый ток в ВЛ, А	1000	1500
Масса, кг	540	630
Длина, см	182	
Вносимое сопротивление, Ом	до ± 2	
Ток КЗ, кА	63	
Срок службы	20 лет и более	

Таблица 2

2. исследование по оптимизации режимов работы энергообъ-

единения Восточного побережья США, показавшее, что установка 3000 модулей D-FACTS на 6 ВЛ позволит уменьшить полные затраты на 1,4% и снизить

D-FACTS МОДУЛИ НА ВЛ

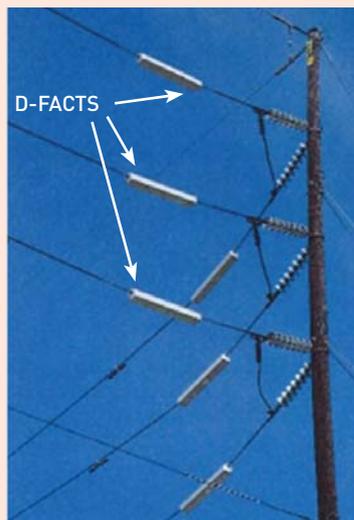


Рис. 4а

РАСПОЛОЖЕНИЕ D-FACTS МОДУЛЕЙ В ПРОЛЕТАХ ВЛ

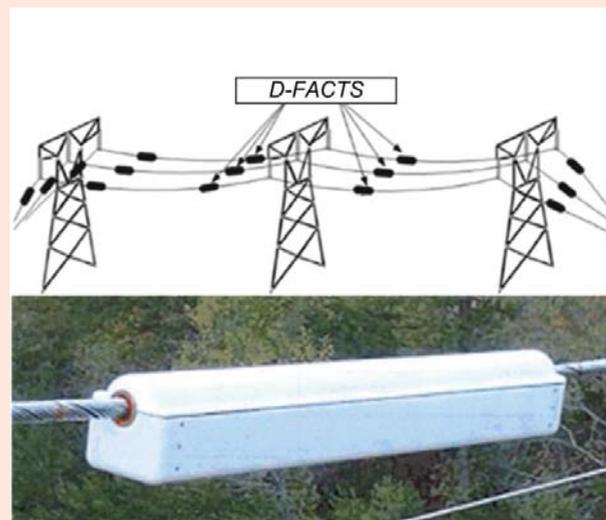


Рис. 4б

ВАРИАНТЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ БРАЗИЛИИ

Вариант	Число до- бавленных ЛЭП	Инвестиции в ЛЭП, млн долл.	Инвестиции в установку D-FACTS, млн долл.	Затраты на разви- тие, млн долл.	Экономия затрат, млн долл.
CS1	25	745	—	745	—
CS2	21	695	24	719	26
CS3	22	694	21	715	30

CS1 — вариант развития сети без использования DSR;

CS2 — вариант развития сети с использованием DSR;

CS3 — вариант развития сети с использованием DSR и TCSC (управляемый тиристорами последовательный компенсатор — Thyristor Controlled Series Compensator).

Таблица 3

среднюю узловую маржинальную стоимость электроэнергии на 6,1% [10].

С целью учета возможностей D-FACTS в различные программные комплексы (ПК) по расчету режимов

энергосистем вносятся дополнения. Одним из таких ПК является моделирующий комплекс энергосистемы Power World Corporation, в который уже внесены дополнения, позволяющие учитывать возможности устройств D-FACTS [11, 12].

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ D-FACTS В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ РОССИИ

Основным свойством распределенных сетевых управляемых устройств является возможность изменения параметров ВЛ. Это позволяет уменьшить влияние неоднородности параметров ВЛ различных классов напряжения на потокораспределение и снизить уравнивательные контурные потоки мощности, и тем самым уменьшить потери мощности и электроэнергии, повысить пропускную способность сети

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА TRU-МОДУЛЯ (C_{DC} — ЕМКОСТЬ КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ, ИСТОЧНИК ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ)

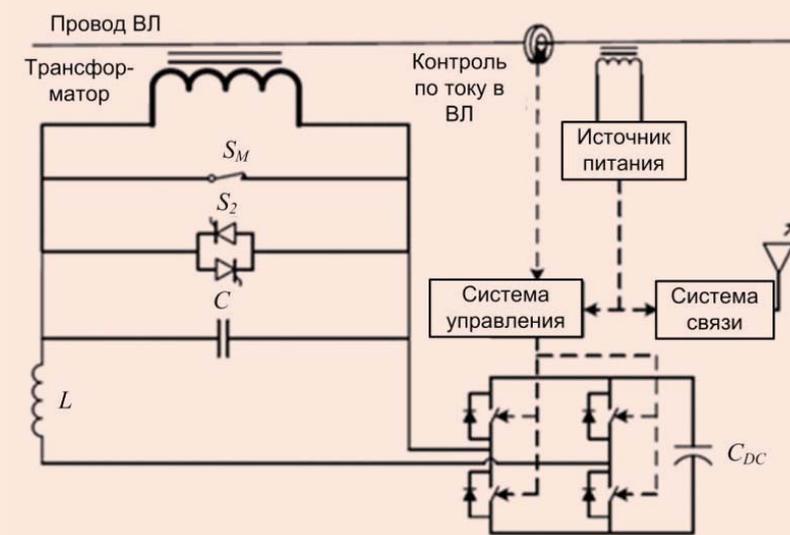


Рис. 5

и качество напряжения. При этом альтернативным устройством, позволяющим снизить влияние неоднородности сети, является фазоповоротное устройство. Другой способ устранения контурных потоков мощности — размыкание контуров в сети, что, однако, приводит к снижению надежности электроснабжения потребителей.

Сама идея внесения индуктивных или емкостных сопротивлений в ВЛ для снижения неоднородности параллельных электрических цепей была давно предложена в ряде работ, в том числе в работах [13, 14]. Однако возможность ее широкой реализации в электрических сетях открывается только при использовании распределенных устройств D-FACTS.

Проведенный анализ используемых в электрических сетях России

опор и проводов для ВЛ 110–220 кВ показал, что по условию их механической прочности максимально допустимое количество DSSC-модулей не должно превышать двух на одну фазу в одном пролете. При этом с точки зрения равномерной механической загрузки опор целесообразно размещать DSSC-модули по обеим сторонам от опоры в непосредственной близости к ней. При этом установка на каждую фазу во всех пролетах двух модулей DSR индуктивностью 47 мкГн каждый позволит увеличить сопротивление ВЛ в 1,2 раза.

Были выполнены расчеты по определению возможности использования устройств D-FACTS в энергосистемах России [15]. Так, анализ схемы замещения энергосистемы Москвы и Московской области выявил целый ряд воздушных и кабельно-воздушных ЛЭП, на ко-

торых потенциально возможна установка DSR-модулей. При этом достигается эффект ограничения токовой загрузки ЛЭП в нормальных и послеаварийных режимах, что позволяет отказаться от сооружения новых ЛЭП 110–220 кВ или осуществить строительство с задержкой во времени.

Анализ схемы выдачи мощности Богучанской ГЭС показал, что установка DSR-модулей на ВЛ 220 кВ Богучанская ГЭС — Приангарская позволит избежать необходимости снижения генерации активной мощности на шинах 220 кВ Богучанской ГЭС на 170 МВт или на шинах 500 кВ на 250 МВт для ограничения потоков мощности в сети 220 кВ при выводе из работы одной из ВЛ 220 кВ Богучанская ГЭС — Приангарская. В нормальном режиме установка DSR-модулей позволит осуществить перераспределение потоков мощности, разгрузить ВЛ 220 кВ Богучанская ГЭС — Приангарская на 16,6 МВт и уменьшить потери активной мощности в рассматриваемой части энергосистемы Красноярского края на 3,5 МВт.

Анализ схемы замещения ЕЭС России на перспективу показал, что применение модулей DSR на ВЛ 220 кВ Зеленодольск — Волжская позволит разгрузить эту ВЛ по току за счет большей загрузки параллельной ВЛ 220 кВ Зеленодольск — Помары, что увеличивает значение максимально допустимого перетока мощности в сечении ОЭС Урала — ОЭС Центра на 200 МВт.

Проведенные исследования транзита 220 кВ Печорская ГРЭС — Инта — Воркута показали, что применение модулей DSC на двух ВЛ 220 кВ — Печорская ГРЭС — Инта длиной около 180 км и Инта — Воркута длиной около 250 км (рис. 6) — позволит повысить предел передаваемой мощности по условию

статической устойчивости. В случае установки модулей DSC на рассматриваемых ВЛ 220 кВ, компенсирующих до 20% индуктивного сопротивления каждой из ВЛ 220 кВ, предел передаваемой мощности может возрасти на 48 МВт для ВЛ Печорская ГРЭС — Инта и на 21 МВт для ВЛ Инта — Воркута. При этом подразумевается размещение двух модулей DSC на каждом пролете обеих ВЛ 220 кВ по аналогии с модулями DSR. В случае применения TRU-модулей, позволяющих вносить в ЛЭП реактивное сопротивление величиной до ± 2 Ом, потребуется установка на опорах ВЛ 220 кВ Печорская ГРЭС — Инта и Инта — Воркута порядка 8 и 11 модулей такого типа соответственно с сопротивлением емкостного характера.

В целом анализ возможности применения устройств D-FACTS в энергосистемах России показал:

- наличие потенциально возможных ЛЭП 110–220 кВ для установки модулей D-FACTS;
- применение модулей DSR на ВЛ 220 кВ может рассматриваться как средство перераспределения мощности между ВЛ при наличии перегрузки одной или более ВЛ при электроснабжении потребителей от за-

кольцеванной сети 220 кВ, работающей параллельно с сетью 500 кВ;

- применение модулей DSC может рассматриваться как средство перераспределения потоков мощности и повышения пропускной способности ЛЭП 220 кВ в энергосистемах, где сети 220 кВ выполняют системообразующие транзитные функции (энергосистемы Республики Коми, Архангельской и Сахалинской обл., Республики Саха (Якутия) и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Кочкин, Ю.Г. Шакарян. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: Торус Пресс. 2011.
2. D. Divan. Distributed Intelligent Power Networks — A New Concept for Improving T&D System Utilization and Performance // T&D Workshop. CMU. Dec. 15–16, 2004.
3. D. Divan. Improving Power Line Utilization and Performance with D-FACTS Devices: <https://web.fe.up.pt>
4. D. Divan, W.E. Brumsickle, R.S. Schneider, B. Kranz, R.W. Gascoigne, D.T. Bradshaw, M.R. Ingram, I.S. Grant. A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Active Power Flow Control on Existing Power Lines // IEEE Trans. on Power Delivery. 2007. V. 22. No 1.
5. D. Divan, H. Johal. Distributed FACTS Devices — A New Concept for Realizing Grid Power Control // IEEE Trans. Power Electronics. 2007. V. 22. Is. 6.
6. H. Johal, D. Divan. Design Considerations for Series — Connected Distributed FACTS Converters // IEEE Trans. Industrial Applications. 2007. V. 43. Is. 6.
7. A. Sadikovic. Power Flow Control for the Grid. Smart Wire Grid, Inc. January 22, 2013: <http://www.powerworld.com>
8. Smart Wires Impact: Case Studies. 2015: smartwires.com
9. R.C. Perez, G.O. Oliveria, M.V. Pereria, D.M. Falcao, F. Kreikebaum, S.M. Ramsay. FACTS and D-FACTS: The Operational Flexibility Demanded by the Transmission Expansion Planning Task with Increasing RES. CIGRE 2014 / Study Committee C1.
10. Technology Solutions for Increasing Capacity and Reliability of Transmission Grid / Smart Wire Grid, Inc. Oakland, CA: smartwires.com
11. Weber J. Distributed AC Transmission System (D-FACTS). Power World Co. 2013: www.powerworld.com
12. M. Laufenberg. D-FACTS Devices in Power World Simulator. 2014: www.powerworld.com
13. В.Г. Холмский. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. М.: Высшая школа. 1975.
14. Н.А. Мельников, С.С. Рокотян, А.Н. Шеренцис. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330–500 кВ. М.: Энергия. 1974.
15. В.А. Баринов, А.С. Маневич, А.С. Мурачев. Применение в энергосистемах нового класса распределенных сетевых управляемых устройств // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 3.

ТРАНЗИТ 220 КВ ПЕЧОРСКАЯ ГРЭС — ИНТА — ВОРКУТА

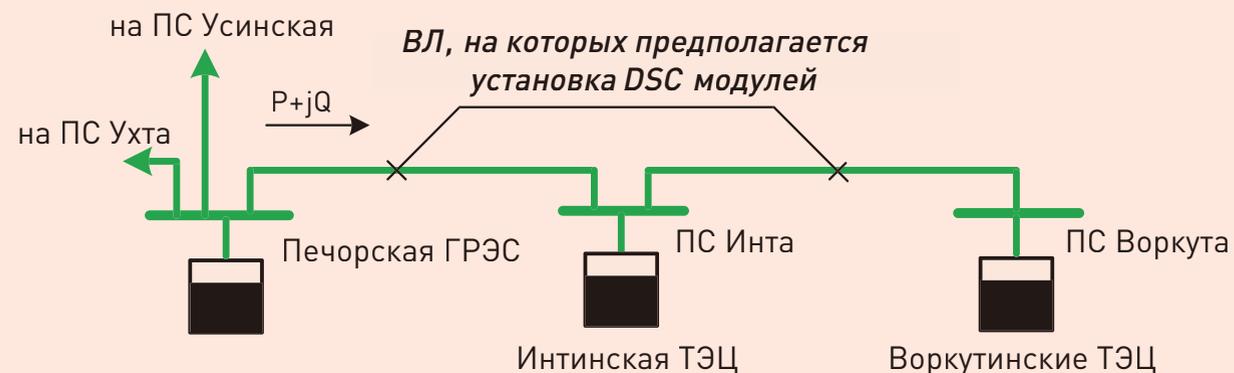


Рис. 6



Системы печати Phoenix Contact

Системный подход к решению вопроса печати маркировки:

- печатающие устройства для любого применения;
- самые распространённые системы нанесения информации;
- большой спектр применяемых типов маркировки;
- возможность выбора материала маркировки;
- контроль состояния печатающего устройства;
- простота в создании и удобство при печати проектов;
- выбор успешных компаний.

Подробная информация на сайте www.phoenixcontact.ru

