

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ РЕВЕРСИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ



Александр БРЯНЦЕВ,
профессор МЭИ, д.т.н.,
академик Академии электротехнических наук РФ,
лауреат премии правительства РФ в области науки и техники;
Михаил БРЯНЦЕВ,
генеральный директор ООО «ЭСКО»,
лауреат премии правительства РФ в области науки и техники;
Светлана ДЯГИЛЕВА,
ведущий научный сотрудник ООО «ЭСКО», к.т.н.;
Ринат КАРЫМОВ,
технический директор ООО «ЭСКО», к.т.н.;
Александр ЛУРЬЕ,
научный консультант ООО «ЭСКО», к.т.н.,
старший научный сотрудник, доктор электротехники, член-корр. АЭН РФ,
лауреат премии правительства РФ в области науки и техники;
Елена МАКЛЕЦОВА,
зам. генерального директора ООО «ЭСКО»,
к.т.н., доцент, лауреат премии правительства РФ в области науки и техники;
Алексей НЕГРЫШЕВ,
начальник отдела маркетинга ООО «ЭСКО».

Основой энергоэффективности в высоковольтных электрических сетях является стабильное напряжение в опорных узлах нагрузки. В то же время в энергоемких регионах мира нарастает и приобретает все большую остроту проблема устойчивой и надежной передачи электроэнергии с заданными параметрами качества и в первую очередь с требуемой стабильностью напряжений сети 110 кВ и выше. На СИГРЭ-2006 обширные системные аварии и «блэк-ауты» напрямую связаны с нестабильностью напряжения высоковольтной сети и определены на уровне «глобальной проблемы мировой электроэнергетики» [1]. Нестабильность напряжения сети – это не только угроза возникновения системных аварий. Это еще и ограничение пропускной способности, повышенные потери электроэнергии, ускоренный износ коммутационного оборудования.

Применение УШР обеспечивает снижение потерь мощности, стабилизацию напряжения, повышение пропускной способности и надежности электрических сетей высокого напряжения. Опыт эксплуатации показал их высокую надежность. Поэтому в основных направлениях технической политики ОАО «ФСК ЕЭС» внедрение УШР рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений модернизации электрических сетей Российской Федерации [3].

В настоящее время установлены, устанавливаются или планируются к установке десятки УШР мощностью 25, 32, 63, 100 и 180 Мвар на напряжения 110 – 500 кВ. Успех УШР основан на том, что при значительно меньшей стоимости в функциональном отношении он полностью замещает тиристорно-реакторную группу статического тиристорного компенсатора (СТК) вместе с повышающим трансформатором, а по конструкции не отличается от обычного двух- или трехобмоточного трансформатора.

В значительной степени проблема обусловлена хроническим и постоянно нарастающим дефицитом управляемых высоковольтных устройств стабилизации напряжения (FACTS-технология). В итоге уже сейчас в ряде важнейших регионов России, Казахстана и других стран СНГ наступил дефицит электроэнергии не из-за недостатка генерирующих мощностей, а из-за проблемы ее транзита от генерации к потребителю [2]. Поэтому задача широкого внедрения управляемых высоковольтных устройств стабилизации напряжения в практику эксплуатации электрических сетей является актуальной. Одним из устройств стабилизации напряжения являются управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШР), которые последние годы интенсивно внедряются в высоковольтные сети 110 – 500 кВ для компенсации зарядной мощности линий электропередачи.

Совместно с батареей статических конденсаторов УШР может выполнять те же функции, что и синхронный компенсатор (СК) или СТК. Принципиальную возможность создания реверсивного высоковольтного источника реактивной мощности (ИРМ) на базе УШР и БСК доказало введение в эксплуатацию в 1999 г. на подстанции «Кудымкар» первого управляемого реактора РТУ 25000/110, установленного параллельно с БСК мощностью 42 Мвар.

энергоснабжение

Установленные в 2004–2005 гг. в ОАО «Томскнефть» три высоковольтных ИРМ на базе реактора РТУ 25000/110 с БСК 54 Мвар подтвердили их высокую эффективность и надежность. Указанные прототипы высоковольтных ИРМ требовали ручного управления БСК. Используемые в них схемы не позволяют создать ИРМ на напряжение выше 110 кВ. Однако успешный опыт эксплуатации этих установок дал основание для создания новых высоковольтных реверсивных источников реактивной мощности 110–500 кВ на базе УШР. Эта работа была выполнена в Московском энергетическом институте совместно с ОАО «Электрические управляемые реакторы» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» в рамках программы создания и применения в ЕЭС России устройств FACTS. В ходе ее выполнения были разработаны следующие схемы ИРМ на базе УШР и БСК:

1. Коммутируемые БСК подключаются параллельно с УШР. Мощность одной секции БСК должна быть меньше или равна мощности УШР. Учитывая, что промышленностью освоено производство БСК на напряжение 220 кВ и ниже, эта схема рекомендуется для сетей напряжением до 220 кВ. Достоинством этого технического решения является то, что количество секций конденсаторной батареи может быть любым и зависит от потребности в выдаче реактивной мощности в точке подключения реактора.

2. БСК подключаются к обмотке управления УШР с номинальным напряжением 11–38,5 кВ. Максимальная мощность БСК ограничивается допустимым тепловым режимом обмотки управления и составляет 30–40 % от мощности сетевой обмотки. Переход от режима потребления к режиму выдачи и наоборот происходит без коммутации БСК. При полностью разгруженном реакторе БСК выдают полную мощность. Эта схема рекомендуется для сетей с напряжением 110–500 кВ.

3. В модификации управляемого реактора, у которого имеется третья обмотка – компенсационная номинальным напряжением 11 кВ, коммутируемая БСК может подключаться к компенсационной обмотке УШР. Максимальная мощность БСК в этом случае равна мощности компенсационной обмотки УШР. Эта схема также рекомендуется для сетей с напряжением 110–500 кВ.

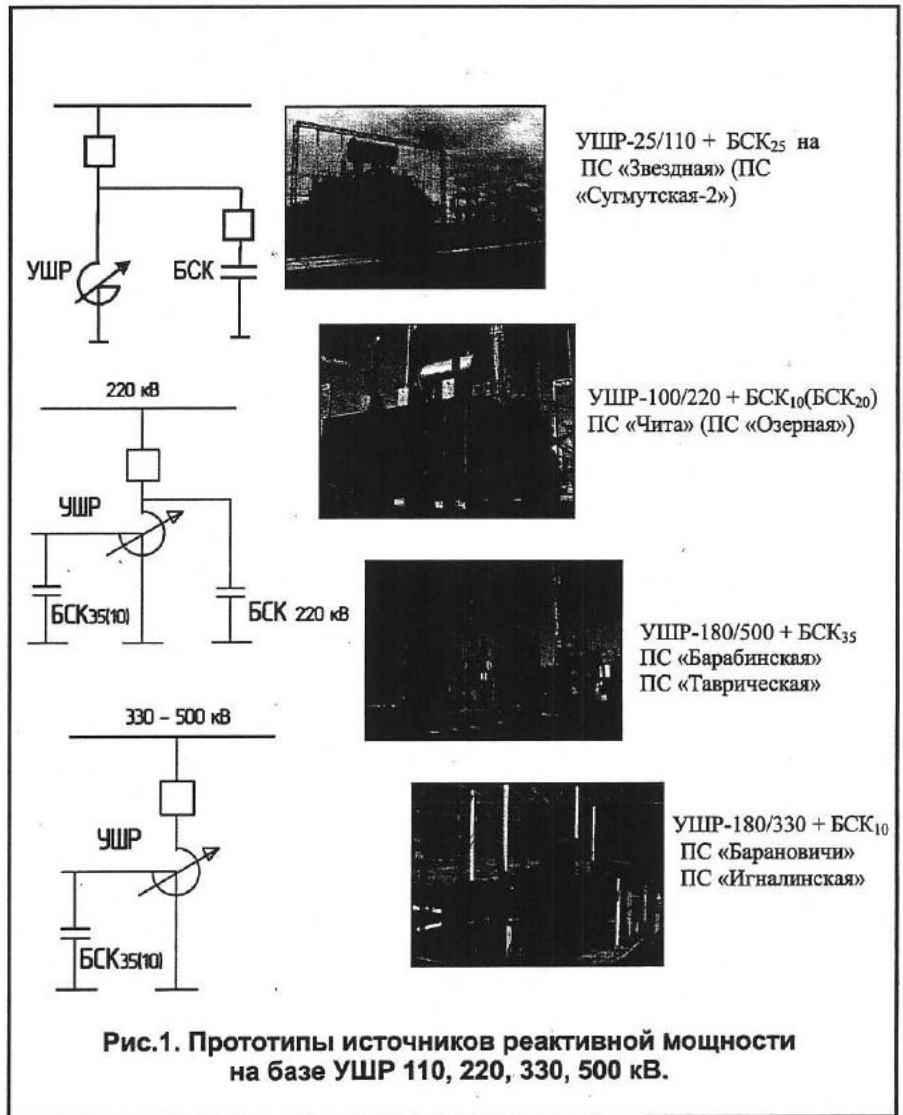


Рис.1. Прототипы источников реактивной мощности на базе УШР 110, 220, 330, 500 кВ.

Описанные схемы являются базовыми. При практической реализации ИРМ может быть разработан на основе одной из этих схем или путем их объединения.

Для проверки реализуемости предложенных технических решений была создана физическая модель УШР и его системы управления. Проведенные на электродинамической модели МЭИ исследования показали работоспособность всех трех вариантов предлагаемого устройства. Предложенные технические решения позволяют расширить функциональные возможности уже существующих и вновь проектируемых реакторов с целью повышения управляемости режимов электрических сетей по напряжению и реактивной мощности. Кроме того, они могут быть использованы при реализации программы замены синхронных компенсаторов, а также как составная часть комплекса мероприятий по предотвращению системных аварий, связанных с лавиной напряжения.

Результаты исследований на электродинамической модели и опыт, полученный при реализации первых ИРМ на базе УШР и БСК, были использованы в дальнейшем при создании прототипов автоматических и автоматизированных высоковольтных ИРМ компанией ООО «Электросетевые компенсаторы». В настоящее время проработаны технические решения для ИРМ для всех основных классов напряжения высоковольтной сети 110, 220, 330, 500 кВ (рис.1). Сейчас идет активное оснащение сетей ФСК и МРСК РФ подобными устройствами [4], позволяющими оптимизировать режимы работы существующей сети с наименьшими капитальными затратами и сроками по сравнению с альтернативными вариантами. Ниже описаны устройство и принцип действия автоматического ИРМ с параллельным подключением УШР и БСК.

Устройство и принцип действия ИРМ

Принципиальная схема ИРМ показана на рисунке 2, где 1 – управляемый шунтирующий реактор, 2 – батарея статических конденсаторов, 3 – система автоматического управления (САУ), 4, 5 – выключатели, ТН – трансформатор напряжения, ТТ – трансформатор тока [5].

Управление ИРМ осуществляется следующим образом. В САУ устанавливаются заданное для регулирования (стабилизации) напряжение сети, минимальный ток реактора, максимальный ток реактора и задержку времени Δt между соседними коммутациями секций конденсаторных батарей (включениями или отключениями выключателей 4 и 5). Обычно интервал времени Δt составляет 1–10 минут в зависимости от параметров ИРМ и сети. Затем управляемый подмагничиванием реактор 1 выключателями подключают к сети [6].

При малой нагрузке или ее отсутствии (что имеет место, например, в часы ночного провала нагрузки) в сети имеется избыток реактивной мощности из-за емкостных токов распределенной емкости высоковольтной сети на землю. В результате напряжение в сети увеличивается выше заданного, что фиксируется трансформаторами напряжения ТН, и САУ 3 вырабатывает команду на увеличение тока подмагничивания реактора 1. В результате ток реактора 1 увеличивается (вплоть до максимального тока), ИРМ переходит в режим потребления реактивной мощности. При этом САУ 3 отслеживает изменение напряжения из-за колебаний нагрузки в сети и осуществляет регулирование его значения на уровне заданной уставки за счет плавного, непрерывного изменения тока подмагничивания реактора 1.

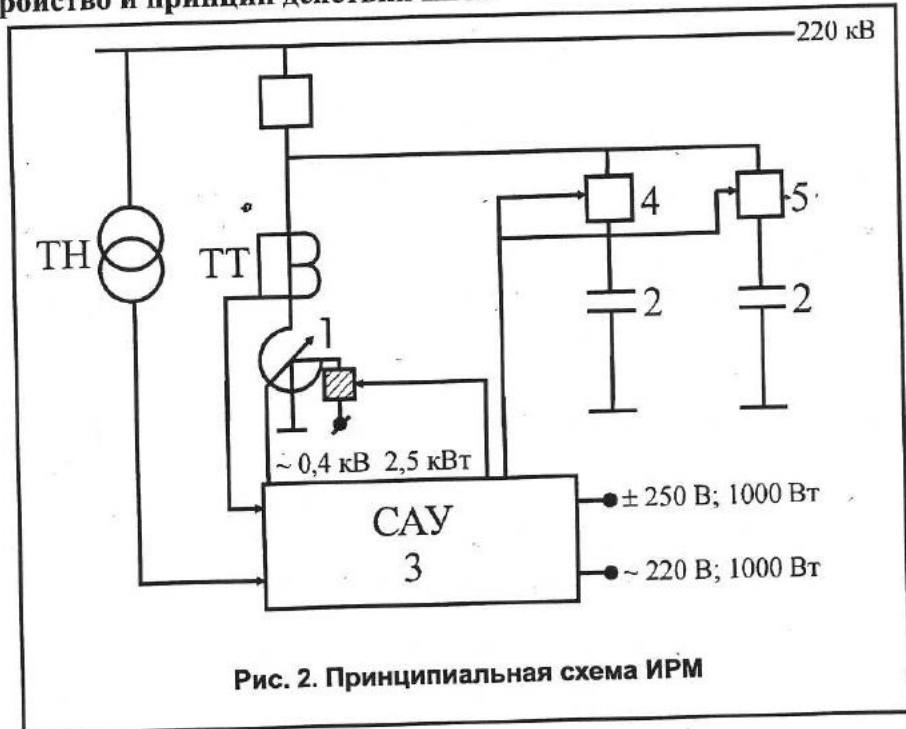


Рис. 2. Принципиальная схема ИРМ

При увеличении нагрузки в сети возникает недостаток реактивной мощности. САУ 3, реагируя на снижение напряжения и проверяя условие тока реактора 1 (меньше минимального), дает команду на подключение к сети выключателем 4 одной секции конденсаторной батареи 2, переводя ИРМ в режим выработки реактивной мощности. При этом плавное регулирование напряжения и реактивной мощности осуществляется реактором.

При дальнейшем увеличении нагрузки сети снова возникают условия, при которых напряжение сети становится меньше заданного и ток реактора 1 меньше минимального. САУ 3 дает команду на подключение выключателем 5 второй секции конденсаторной батареи 2.

При снижении нагрузки в сети возникает избыток реактивной мощности, и напряжение возрастает. От ИРМ требуется переход от режима выдачи реактивной мощности к режиму потребления реактивной мощности. Поэтому САУ 3 вырабатывает команды на увеличение тока реактора и на отключение секций конденсаторной батареи [6, 7]. Следует отметить, что управляемый реактор в схеме ИРМ на рис. 2 самоподмагничиваемый. Применение таких реакторов позволяет обеспечить питание трансформаторов со встроенными преобразователями непосредственно от реактора без использования шин 10 кВ собственных нужд подстанции. Это упрощает включение ИРМ в схему подстанции и приводит к удешевлению ИРМ за счет того, что не требуется фидер питания по стороне 10 кВ.

Опыт применения компенсирующих устройств

Результаты установки ИРМ на ПС «Кудымкар». Применение УШР на подстанции «Кудымкар» было вызвано тем, что вследствие резко переменного графика нагрузки требовались ежедневная коммутация существующей БСК (число коммутаций в год доходило до 800) и постоянная работа регуляторов напряжения (РПН) трансформаторов (около 1800 переключений). При этом значения напряжения на шинах 110 кВ изменялись от 107 кВ до 118 кВ. После установки УШР число коммутаций БСК и РПН сократилось примерно в 100 раз, отклонения напряжения ограничены до $\pm 1,5\%$. Кроме того, за

счет повышения пропускной способности транзита строительство дополнительной линии 220 кВ отнесено на 10–15 лет.

Результаты установки ИРМ на ПС «Игольская» и «Двуреченская». К концу 2003 г. на нефтяных месторождениях Южного Васюгана ОАО «Томскнефть» (рис. 3) возникла кризисная ситуация. Пропускная способность электропередачи 110 кВ «Парабель–Лугинецкая–Игольская–Крапивинская» была исчерпана, а уровни напряжения на ПС–110 кВ «Крапивинская» не превышали 85% от номинального. И только в августе–октябре 2004 г. после ввода на

ПС–110 кВ «Игольская» батареи статических конденсаторов (БСК) 23 Мвар, УШР 25 Мвар и ПС–110 кВ «Двуреченская» с БСК 23 и УШР 25 Мвар ситуация коренным образом изменилась в лучшую сторону. Пропускная способность выросла на 30–50%, уровни напряжения достигли 105–110% от номинального и могут регулироваться в широком диапазоне в зависимости от режимов. В заключении по итогам первоначального периода эксплуатации реакторов РТУ–25000/110–У1 отмечается, что реакторы совместно с батареями статических конденсато-

энергоснабжение

1. Обеспечивают оптимальные потоки реактивной мощности, позволяющие довести передаваемую мощность вплоть до предельно допустимой токовой нагрузки проводов по нагреву. По состоянию на март 2005 г. достигнуто 100 % взаимного резервирования электрических нагрузок электропередачи «Парабель–Двуреченская–Чапаевка». Необходимость перевода региона на напряжение 220 кВ потеряла свою актуальность.

2. Снижают потери активной мощности в проводах ВЛ–110 кВ. При нагрузке 72 МВт потери составляют 7,5 МВт против 11,9 МВт, в том числе в сетях ООО «Энергонефть-Томск» 1,8 МВт против 2,9 МВт.

3. Обеспечивают плавную автоматическую стабилизацию заданных уровней напряжения в установившихся режимах при сокращении числа коммутаций БСК и РПН в десятки раз.

Результаты установки ИРМ на ПП «Таврическая». До установки ИРМ напряжение на шинах 110 кВ ПП «Таврическая» не превышало 98 кВ. РПН трансформаторов на подстанциях, получающих от нее питание, находились в крайнем положении. При выводе в ремонт одной из питающих линий вводились ограничения потребителей на 70 МВт.

В 2008 г. на переключательном пункте (ПП) «Таврическая» был введен в эксплуатацию первый автоматический ИРМ, состоящий из БСК мощностью 2×25 Мвар и УШР мощностью 1×25 Мвар. Анализ результатов начального периода эксплуатации ИРМ-110/50/25 на ПП «Таврическая», выполненный специалистами ОАО «Тюменьэнерго», показал, что после ввода в работу ИРМ напряжение на шинах 110 кВ этой подстанции увеличилось на 3–4,4 %, а отклонения напряжения снижены более чем в 8 раз (рис. 4). Причем ИРМ, как видно из рис. 4, обеспечил поддержание напряжения на шинах 110 кВ подстанции с точностью ± 200 В, т.е. ± 0.2 % от заданной уставки. Вследствие повышения напряжения на 2-й ступени изменились положения РПН трансформаторов на подстанциях, получающих питание от ПП «Таврическая». Изменилась загрузка реактивной мощностью питающих линий на 33–42% и автотрансформаторов на 9–20%.

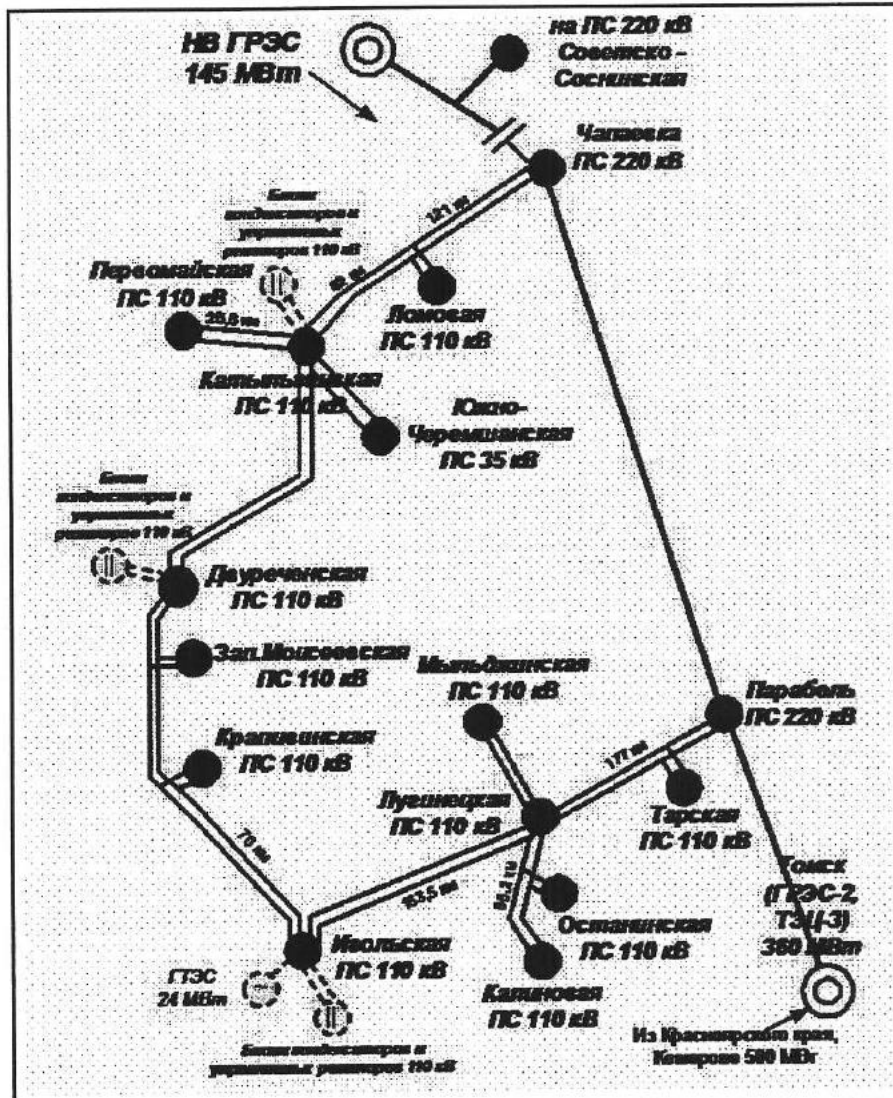


Рис. 3. Схема электроснабжения на нефтяных месторождениях Южного Васюгана ОАО «Томскнефть». В 2004 г. на ПС «Игольская», «Двуреченская» и «Катильгинская» установлены ИРМ с БСК мощностью 23 Мвар и УШР мощностью 25 МВА.

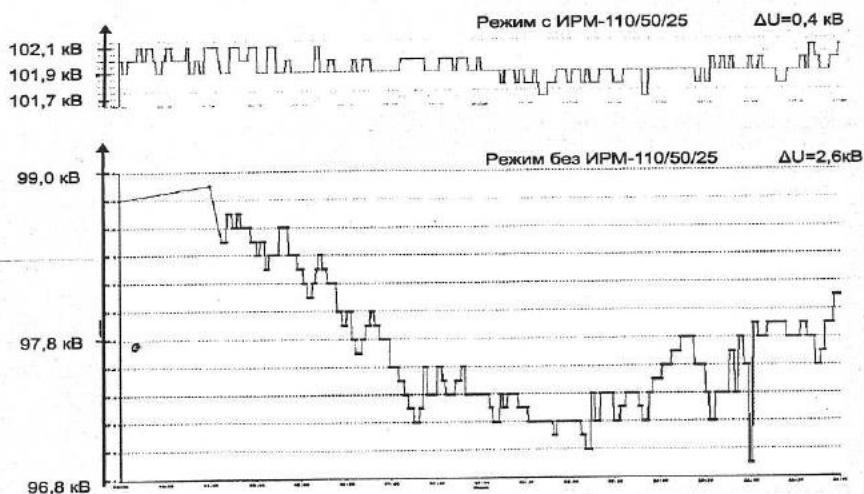


Рис. 4. График напряжения на ПП «Таврическая» до и после использования ИРМ-110/50/25 (из презентации «Тюмень, 2007. Компенсация реактивной мощности и стабилизация напряжения в электрических сетях ОАО «Тюменьэнерго», питающих предприятия нефтегазового комплекса»).

Более поздний анализ показал, что введение в эксплуатацию ИРМ на ПП «Таврическая» дало возможность увеличить пропускную способность линий электропередачи, а также повысить надежность электроснабжения потребителей и качество электроэнергии. В частности, ограничения потребителей при выводе в ремонт одной из питающих линий снизились до 30 МВт. Кроме того, при аварийном останове потребителю газотурбинной электростанции отключения потребителей, как это было ранее, не происходило.

В заключение отметим, что за период с 2008 г. по настоящее время было введено в эксплуатацию 12 ИРМ на базе УШР и БСК. Еще три установки находятся на стадии наладочных работ или изготовления. Причем одна из них имеет номинальное напряжение 240 кВ. Ведутся проектные работы по созданию ИРМ на базе УШР и БСК на напряжение 35 кВ. Все ИРМ комплектуются УШР серии РТУ выпускаемых серийно ОАО «Запорожтрансформатор» и БСК производства «Nokia Saracitors». Интерес, проявляемый к ИРМ на базе УШР и БСК, объясняется не только тем, что они имеют значительно меньшую стоимость, чем СТК или СК, но и тем, что они требуют существенно меньших затрат на монтаж и эксплуатацию.

Заключение

1. На основе авторских решений и при непосредственном участии специалистов МЭИ(ТУ) и ООО «ЭСКО» разрабатываются, промышленно осваиваются, производятся высоковольтные реверсивные источники реактивной мощности на базе БСК и управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов следующих типов:

- трехобмоточные УШР 110–500 кВ с симметричным регулированием мощности фаз;
- двухобмоточные УШР 35–500 кВ с пофазным или симметричным регулированием мощности фаз;
- УШР 6÷35 кВ однообмоточные самоподмагничиваемые;

ИРМ могут выполняться с функциями симметрирования, фильтрации высших гармоник, ограничения токов короткого замыкания в электрической сети.

2. Разрабатываемые МЭИ(ТУ) совместно с ООО «ЭСКО» высоково-

льтные реверсивные источники реактивной мощности (ИРМ) на базе УШР и БСК могут выполнять в электрических сетях те же функции, что выполняют СК и СТК.

Основные преимущества перед альтернативными решениями:

- ИРМ на базе УШР включаются непосредственно в точку сети, где требуется поддержать напряжение. Поэтому они имеют меньшую установленную мощность и позволяют обеспечить более высокую эффективность регулирования напряжения.

- Стоимость ИРМ на базе УШР и БСК значительно ниже стоимости СК и СТК той же установленной мощности. Кроме того, они требуют существенно меньших затрат на монтаж и эксплуатацию.

3. Опыт эксплуатации ИРМ на базе УШР и БСК показал, что включение в сеть такого устройства позволяет:

- повысить напряжение в точке подключения и поддерживать его на заданном уровне как в нормальных, так и в послеаварийных режимах;

- уменьшить количество переключений РПН трансформаторов;

- увеличить пропускную способность линий электропередачи вплоть до предела по нагреву проводов;

- предотвратить нарушение устойчивости асинхронной нагрузки при набросе нагрузки и при коротком замыкании;

- снизить потери мощности и электроэнергии в электрических сетях.

4. Широкое применение ИРМ на базе УШР и БСК на линиях 110 кВ и выше позволит:

- повысить экономичность работы энергосистем за счет снижения потерь в электрических сетях и обеспечить выполнение требований стандартов на качество электроэнергии в распределительных сетях;

- существенно снизить ущерб, наносимый субъектам рынка электроэнергии от недопустимого снижения качества электроэнергии;

- сократить объем электросетевого строительства за счет максимального использования пропускной способности существующих линий электропередачи.

5. В целях оперативного полномасштабного освоения рынка электросетевых компенсаторов МЭИ(ТУ) и ООО «ЭСКО»:

- оказывают услуги в разработке и инженерном сопровождении целевых программ по оснащению сети электросетевыми компенсаторами до технически целесообразного уровня;

- предлагают сотрудничество по расширению объемов промышленного освоения, в том числе с использованием производственной базы отечественных производителей.

Литература

1. Брянцев А.М., Вариводов В.Н. Особенности технической политики в электрических сетях мегаполисов. «Энергоэксперт» №1, 2007, с 18–25.

2. Брянцев А., Дорофеев В., Зильберман М., Смирнов А., Смоловик С. Magnetically Controlled Shunt Reactor Application for AC HV and EHV Transmission Lines. CIGRE Session 41. 2006. В4-307. Материалы Генеральной 41-й сессии СИГРЭ, Париж, Франция, 27.08.-01.09. 2006 г.

3. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы // Сб. статей. Под ред. д.т.н. проф. А.М. Брянцева. М.: «Знак». 2004. 264 с.

4. Брянцев А.М., Брянцев М.А., Дягилева С.В., Карьмов Р.Р., Маклецова Е.Е., Негрышев А.А. Источники реактивной мощности 110–500 кВ на базе управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов и батарей конденсаторов. «Энергоэксперт» №2, 2009, с. 76–79.

5. Брянцев А.М. Источники реактивной мощности. Патент №2335056. Бюллетень №27 от 27.09.08.

6. Брянцев А.М. Источники реактивной мощности. Патент №2335026. Бюллетень №27 от 27.09.08.

7. Брянцев А.М. Способы управления источником реактивной мощности. Патент №2337424. Бюллетень №30 от 27.10.08.

**Подробную информацию
можно получить
в ООО «ЭСКО»**

по адресу:

**Россия, 111250,
г. Москва,
ул. Красноказарменная,
дом 14,**

т./факс +7(495)995 52 28,

e-mail: esko@mail.ru