

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ВКЛЮЧЕНИЯ  
НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ РАЗДЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ЧАСТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

**А.П. Мальцев, В.Е. Рудник, Р.А. Уфа**

Научный руководитель - старший преподаватель Р.А. Уфа

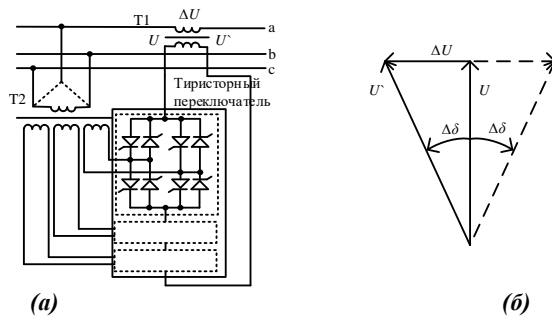
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

На данный момент энергосистема Томской области представляет из себя две отдельно работающие части – северную и южную, раздел между которыми проходит по транзиту 220 кВ Нижневартовская ГРЭС – подстанция (ПС) 500 кВ Томская между ПС 220 кВ Парабель и ПС 220 кВ Вертикас. При этом в северной части расположены предприятия нефтегазовой отрасли, которые представляют из себя крупные узлы нагрузки, основная доля которой приходится на двигательную нагрузку, в составе которой присутствуют как асинхронные двигатели, так и мощные синхронные двигатели. В южной части, наоборот, сосредоточены основные источники генерации, а именно Томские ТЭЦ-3 и ГРЭС-2, ОАО «Объединенная теплоэнергетическая компания», газотурбинные электростанции. Объединение данных отдельно работающих частей обеспечит надежное электроснабжение потребителей на предприятиях нефтегазовой отрасли, обмен мощностью между Томской и Тюменской энергосистемами, повышение уровня эксплуатационной надежности, особенно на время проведения оперативных переключений.

Одной из важнейших задач при решении задачи объединения является определение угла между векторами напряжения ( $\delta$ ), при котором не произойдет нарушения статической и динамической устойчивости при объединении энергосистем. Согласно результатам натурных измерений угла между векторами напряжения Томской и Тюменской энергосистем, угол колеблется в пределах от  $-40^\circ$  до  $50^\circ$  [1]. Отрицательное значение соответствует опережению Тюменской ЭС, то есть перетоку мощности со стороны Тюменской ЭС, положительное – Томской [2].

В связи с вышесказанным, для решения данной задачи можно применить средства с использованием функции контроля синхронизма, то есть включение выключателя с ожиданием или улавливанием синхронизма. В частности, при использовании автоматического повторного включения с ожиданием синхронизма (АПВОС) допускается значение угла расхождения  $\delta$  до  $70^\circ$  [3]. При этом, согласно данных испытаний, предельный угол, при котором возможно синхронное объединение, составляет  $47^\circ$  [4]. В связи с этим, возможным решением данной задачи является применение устройств FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System), в частности, фазопоротного устройства (ФПУ), объединенного регулятора потоков мощности (ОРПМ), вставки постоянного тока на базе преобразователей напряжения (ВПН). Ниже представлен анализ

ФПУ осуществляет регулирование разности фаз между напряжениями по концам электропередачи, что, соответственно, обеспечивает управление перетоком активной мощности и увеличивает пропускную способность этой электропередачи.



**Рис. 1** Схема (а) и векторная (б) диаграмма полупроводникового ФПУ

В состав ФПУ входят два трансформатора – последовательный (Т1) и параллельный (Т2), которые включены в фазу линии и на междуфазное напряжение соответственно. Напряжение в конце линии ( $U'$ ) относительно напряжения в начале линии ( $U$ ) будет определяться величиной напряжения последовательной обмотки ( $\Delta U$ ), которое сдвинуто по отношению к фазному напряжению на  $90^\circ$ .

$$U' = U \pm \Delta U$$

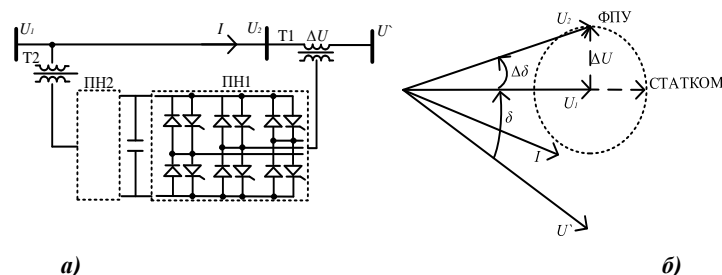
$$\delta = \delta' \pm \Delta \delta$$

Изменение угла по величине и по знаку, осуществляемое блоком управления тиристорным переключателем, обеспечивает изменение перетока активной мощности по данной линии.

Обозначенные свойства и возможности позволяют рассматривать ФПУ для объединения отдельно работающих частей энергосистемы Томской области. Однако следует отметить, что современные ФПУ с полупроводниковым управлением имеют пределы регулирования по углу  $40^\circ$  [5, 6], что влечет за собой ограничения, которые вряд ли будут сняты в ближайшее время.

Аналогично ФПУ, схема ОРПМ включает в себя последовательный и параллельный трансформаторы, при этом так же в состав схемы входят два преобразователя напряжения (ПН), работающие на общем звено постоянного тока (рис. 2) [7]. Через последовательный трансформатор Т1 посредством ПН1 вводится дополнительное напряжение ( $\Delta U$ ), величина и фаза которого может регулироваться, с целью регулирования активной мощности по величине и по знаку. Изменение режима работы ПН1 приводит к изменению фазы  $\Delta U$  без каких-либо ограничений, за счет чего изменяется разность фаз напряжений по концам линии и, соответственно,

переток активной мощности. С помощью ПН2, который подключен к шине через параллельный трансформатор (Т2), осуществляется снабжение активной мощностью по цепи постоянного тока преобразователя ПН1 для создания необходимой величины добавочного напряжения. Посредством ПН2 обеспечивается независимая поперечная компенсация линии как в режиме генерации, так и потребления реактивной мощности, что обеспечивает поддержание уровня напряжения в узле подключения линии [7].

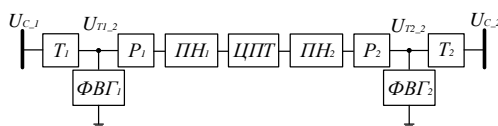


**Рис. 2** Схема (а) и векторная (б) диаграмма ОРПМ

Специфика функционирования ОРПМ позволяет рассматривать это устройство как ФПУ для управления потоками электроэнергии, перераспределяя мощности по недогруженным линиям для оптимального использования пропускной способности транзитных линий; как управляемое устройство продольной и поперечной компенсации [7].

Несмотря на все свои преимущества, ОРПМ на сегодняшний день имеет такие недостатки, как высокая удельная стоимость (120÷150 \$/кВА), сложность настройки системы автоматического регулирования с целью согласования режимов работы ПН, высокие коммутационные потери, величина которых превышает величину аналогичных потерь в СТАТКОМ и статическом синхронном последовательном компенсаторе примерно в два раза. Ввиду обозначенных недостатков, ОРПМ не получили широкого внедрения [7,8].

Современные вставки постоянного тока доказали эффективность в решении задач несинхронного объединения ЭЭС, повышения пропускной способности элементов сети, интеграции распределенных возобновляемых источников энергии [9, 10]. Особенно интенсивное развитие получили ВПТН, реализованные на базе более совершенных полностью управляемых полупроводниковых ключей, структурная схема ВПТН представлена на рисунке 3.



**Рис. 3** Структурная схема ВПТН: Т1 и Т2 – трансформаторы связи, ФВГ1 и ФВГ2 – фильтры высших гармоник, P1 и P2 – фазные реакторы, ПН1 и ПН2 – статические преобразователи напряжения, ЦПТ – цепь постоянного тока

Опыт эксплуатации показал, что ВПТН способны эффективно решать такие задачи управления режимами энергосистем, как независимое управление активной и реактивной мощностью, демпфирование колебаний мощности, ограничение токов короткого замыкания, фильтрация высших гармоник, повышение предела передаваемой мощности, симметрирование несимметричной нагрузки [11].

Вышеприведенный анализ средств включения на параллельную работу раздельно работающих частей Томской энергосистемы показал, что наиболее эффективным будет применение вставки постоянного тока на базе преобразователей напряжения ввиду того, что применение данного устройства не предполагает каких-либо режимных ограничений, имеет достаточно широкий опыт применения в мировой практике и позволяет дополнительно решать ряд задач по повышению качества управления режимами в объединенной энергосистеме.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант №МК-2150.2019.9*

#### Литература

1. Лебедев Н.В., Литвак В.В., Маркман Г.3, Харлов Н.Н. Вероятностные характеристики угла расхождения векторов напряжения Томской и Тюменской энергосистем // Межвузовский сб. научных трудов «Анализ и управление режимами систем электроснабжения в условиях неопределенности». – Новосибирск, 1990. – С. 81–84.
2. Лебедев Н.В. Измерение угла расхождения векторов напряжения Томской и Тюменской энергосистем // Сборник «Процессы и режимы электрических систем». – Томск, 1990. – С. 55–59.
3. Алексеев О.П. Автоматика электроэнергетических систем / Под ред. В.Л. Козиса и Н.И. Овчаренко – М.: Энергоиздат. – 1981. – 479 с.
4. Основы регионального энергосбережения (научно-технические и производственные аспекты) / Под ред. В.В. Литвака. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. – 288 с.
5. Пат. на п/м 107421 Россия МПК H02M5/12. Фазоповоротное устройство Панфилов Д.И., Рашитов П.А., Ремизевич Т.В., Стельмаков В.Н. Заявлено 08.04.2011; Оpubл. 10.08.2011, Бюлл. №22.
6. Пат. на п/м 110558 Россия МПК H02J3/12. Полупроводниковое фазоповоротное устройство Жмуров В.П., Стельмаков В.Н., Тарасов А.Н. Заявлено 08.06.2011; Оpubл. 20.11.2011, Бюлл. №32.