

АЛГОРИТМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ МАГНИТОГОРСКОГО РАЙОНА ЧЕЛЯБИНСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМАМИ СРЕДСТВАМИ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Е.Е. Горшков, М.Е. Гольдштейн
ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет" (НИУ)
Челябинск, Россия
E-mail: Psyke_Scan@mail.ru

Аннотация - Высокое качество энергоснабжения потребителей обеспечивается развитием управляемости режимами энергосистемы и повышением устойчивости. В последние годы эти задачи решаются применением гибких (управляемых) линий электропередачи переменного и постоянного тока – FACTS. Элементы, базирующиеся на этой технологии: вставка постоянного тока, управляемая продольная компенсация, объединенный регулятор потоков мощности, статический компенсатор реактивной мощности – СТАТКОМ, фазоповоротное устройство в своей основе содержат преобразователь напряжения (ПН), который придает им особые функциональные свойства. Сегодня раскрыты и исследованы далеко не все аспекты влияния режимов работы устройств на базе ПН в нормальных и аварийных режимах сети. Актуальной является задача определения влияния устройств FACTS на алгоритмы работы противоаварийной автоматики в энергосистеме. При исследовании применялись методы математического анализа, в качестве инструмента математического моделирования использовался ПК «RastrWin3». Рассмотрен алгоритм работы противоаварийной автоматики Магнитогорского района Челябинской энергосистемы сначала без устройств на базе силовой электроники, а затем с применением устройств FACTS. При этом рассмотрены различные режимы работы устройств на базе преобразователя напряжения и энергосистемы. Полученные результаты позволяют оценить влияние на надежность электрической сети устройств на базе преобразователя напряжения в нормальных и аварийных режимах сети, что позволит выбирать алгоритмы работы противоаварийной автоматики.

Ключевые слова — технология FACTS, преобразователь напряжения, противоаварийная автоматика.

ALGORITHM OF EMERGENCY CONTROL OF MAGNITOGORSK DISTRICT OF CHELYABINSK POWER GRID WITH USE OF POWER ELECTRONICS DEVICES FOR REGIMES CONTROL

E.E. Gorshkov, M.E. Goldstein
South Ural State University
Chelyabinsk, Russian Federation
E-mail: Psyke_Scan@mail.ru

Abstract - High quality of power supply of consumers is ensured by the development of controllability of the power grid regimes and increase of sustainability. In recent years, these tasks were solved by using flexible (controllable) AC and DC power lines - FACTS. Elements based on this technology are: HVDC transmission line, controllable compensation, unified power flow controller, static synchronous compensator, phase-shifting device basically contain a voltage transducer (VT), which gives them special functional properties. Nowadays not all aspects of the impact of regimes control of devices based on VT in normal and emergency regimes of the network are disclosed and investigated. This is why the task of determining the influence of FACTS devices on the algorithms of the power grid emergency control remains topical. The research used methods of mathematical analysis, as a tool for mathematical modeling, the "RastrWin3" was used. The algorithm of the emergency control of the Magnitogorsk district of the Chelyabinsk power grid is considered firstly without devices based on power electronics, and then using FACTS devices. In this case, various models of control of devices based on a voltage transducer and a power system are considered. The received results show influence of VT-based devices on reliability of the power grid in normal and emergency regimes of the power grid that gives a choice between algorithms of emergency control automatics.

Keywords — FACTS technology, voltage transducer, emergency control.

I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Необходимость внедрения устройств на базе технологии гибких (управляемых) линий электропередачи переменного и постоянного тока (FACTS) обусловлена рядом решаемых задач в электрической сети [1, 2]: обеспечение качества напряжения у потребителей, поддержание реактивной мощности генераторов в допустимых пределах, управление перетоками реактивной мощности в сети, снижение потерь электроэнергии, повышение пропускной способности линий электропередачи по критериям статической и динамической устойчивости и т.д. [3, 4]. Аналогичные электромеханические устройства (синхронные компенсаторы (СК), управляемые шунтирующие реакторы (УШР), фазопоротные устройства (ФПУ) и др.), применяемые в энергосистеме для решения этих задач, являются менее эффективными и обладают более низким диапазоном использования [5, 6]. Устройства FACTS выполняются на базе преобразователя напряжения (ПН). Вопросы разработки алгоритмов управления, исследования режимов работы ПН посвящено много работ отечественных и зарубежных авторов [7]. Однако, раскрыты и исследованы далеко не все аспекты функционирования ПН и устройств FACTS на базе ПН, а также их влияние на алгоритмы работы устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики при внедрении в энергосистему. Для более полного анализа алгоритмов противоаварийной автоматики при применении в сетевом районе устройств FACTS на базе ПН рассмотрим следующие задачи:

- анализ алгоритма работы противоаварийной автоматики исходного энергетического района без управления режимами средствами силовой электроники;
- разработка способов повышения эффективности управления режимами энергетического района с помощью внедрения устройств на базе силовой электроники;
- анализ алгоритма работы противоаварийной автоматики энергетического района при управлении режимами средствами силовой электроники.

Объектом исследований примем Магнитогорский район Челябинской энергосистемы.

II. РАБОТА ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ В МАГНИТОГОРСКОМ РАЙОНЕ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Магнитогорский район входит в состав Челябинской энергосистемы и граничит с Оренбургской энергосистемой (ОЭ), энергосистемой Республики Башкортостан (БЭ). Схема Магнитогорского района в нормальном режиме представлена на рис. 1.

В качестве методов анализа ПА Магнитогорского энергорайона применялись методы системного анализа, теоретических основ релейной защиты и автоматики, моделирование установившегося режима электроэнергетической сети.

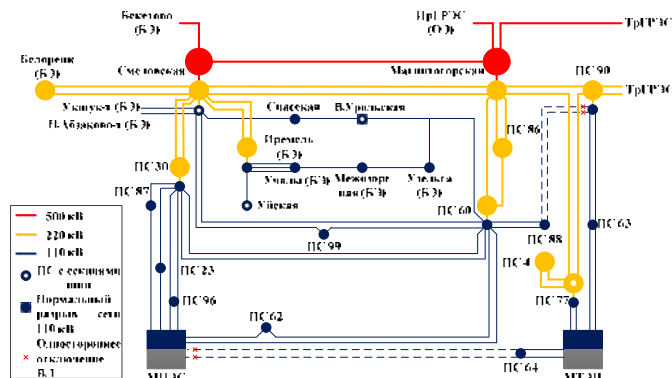


Рис. 1. Схема Магнитогорского района

Магнитогорский район является дефицитным $P_{\text{деф}}=634,1$ МВт. В нормальной схеме через Магнитогорский район (ПС 500 кВ Магнитогорская, ПС 500 кВ Смеловская, ПС 220 кВ 90) осуществляется транзит мощности от Оренбургской (ПС 500 кВ Ирилинская ГРЭС) и Челябинской энергосистемы (ПС 500 кВ Троицкая ГРЭС) в энергосистему Республики Башкортостан (ПС 500 кВ Бекетово, ПС 220 кВ Белорецк, ПС 220 кВ Ирменель, ПС 110 кВ Абзаково, ПС 110 кВ Укшук-т, ПС 110 кВ Узельга). Покрытие дефицита мощности энергорайона происходит за счет потребления из транзитного перетока через ПС 500 кВ Магнитогорская, ПС 500 кВ Смеловская, ПС 220 кВ 90.

При анализе работы автоматики рассматривались летние ремонтные схемы в районе. Наиболее вероятной является схема вывода в ремонт ВЛ 500 кВ Магнитогорская – Смеловская. В качестве анализа противоаварийной автоматики Магнитогорского района смоделирован алгоритм работы АОПО с наиболее тяжелыми последствиями для Магнитогорского района, а именно АРЛ ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская I, II цепь с уставкой срабатывания $I_{\text{уст}}=710$ А и выдержкой времени $t=18с$, управляющее воздействие которой приведено в таблице I.

Таблица I. АОПО ВЛ 220 кВ МАГНИТОГОРСКАЯ – СМЕЛОВСКАЯ

Название объекта	Действие
ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская I, II цепь, АРЛ	1) При включенном АТГ на ПС 500 кВ Смеловская: а) Деление сети – отключение с запретом АПВ выключателей: ВЛ 110 кВ ПС 60 – ПС 99, ВЛ 110 кВ ПС 60 – Смеловская, КВЛ 110 кВ ПС 30 – ПС 60 I, II цепь, ВЛ 110 кВ ПС 60 – ПС 62, ВЛ 110 кВ МЦЭС – ПС 60, ВЛ 110 кВ ПС 60 – Узельга, ВЛ 110 кВ Ирменель – Уйская; б) Отключение с запретом АПВ выключателей ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская I, II цепь.
	2) При отключенном АТГ на ПС 500 кВ Смеловская: а) отключение нагрузки на ПС 110 кВ 96, ПС 220 кВ 60, ПС 110 кВ 99, ПС 220 кВ 30, ПС 220 кВ Белорецк, ПС 220 кВ Ирменель; б) отключение с запретом АПВ выключателей 220 кВ АТЗ на ПС 500 кВ Смеловская

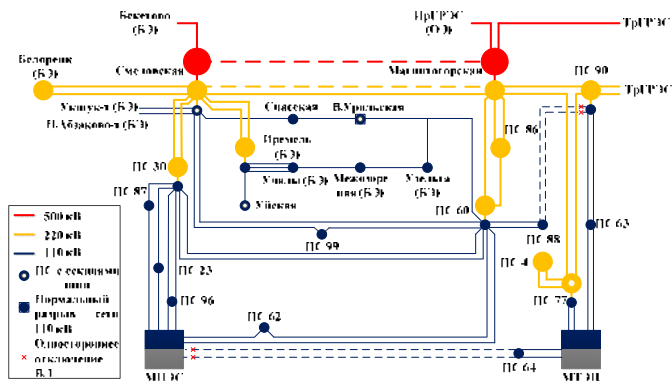


Рис. 2. Перегрузка ВЛ Магнитогорская – Смеловская II цепь при выводе в ремонт ВЛ 500 кВ Магнитогорская – Смеловская

В зависимости от управляющего воздействия проанализированы два случая срабатывания АРЛ: при включенном и при выведенном в ремонт АТГ на ПС 500 кВ Смеловская. В нормальной схеме энергорайона АТГ ПС 500 кВ Смеловская включен. В качестве нормативного возмущения рассматривалось отключение короткого замыкания (КЗ) одной цепи ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская, при котором возникает перегрузка по току второй цепи ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская. Смоделированы схемно-режимные ситуации в сети, при которых происходит срабатывание АРЛ:

1) Перегрузка одной цепи ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская при отключении КЗ на второй цепи ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская при выведенной в ремонт ВЛ 500 кВ Магнитогорская – Смеловская представлена на рис. 2. Срабатывание АРЛ приводит к делению сети, представленному на рис.4.

2) Перегрузка одной цепи ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская при отключении КЗ ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская при выведенной в ремонт АТГ 500 кВ Смеловская представлена на рис.3. Срабатывание АРЛ приводит к отключению нагрузки энергорайона в объеме $P_{OH} \approx 330$ МВт.

В качестве инструмента расчета установившегося режима использовался программный комплекс «RastrWin3». Для моделирования электромагнитных и электромеханических процессов использовался программный комплекс «RusTab».

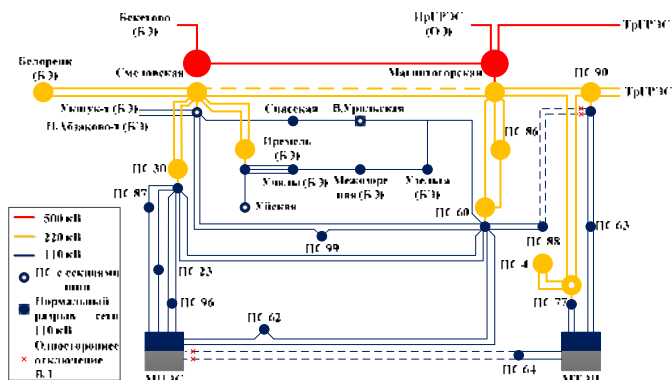


Рис. 3. Перегрузка ВЛ Магнитогорская – Смеловская II цепь при выводе в ремонт АТГ на ПС 500 кВ Смеловская

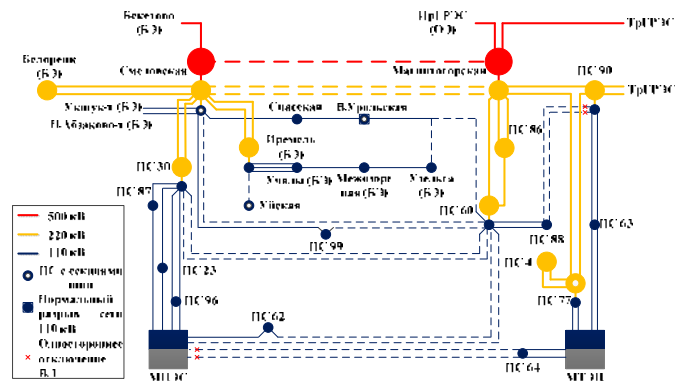


Рис. 4. Деление сети АРЛ ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская II цепь при включенном АТГ на ПС 500 кВ Смеловская

Деление сети Магнитогорского энергорайона разрывает транзит мощности между ПС 500 кВ Магнитогорская и ПС 500 кВ Смеловская, ограничивая электрическую связь между Челябинской энергосистемой и энергосистемой Республики Башкортостан. Разрыв транзита мощности снижает надежность сети Магнитогорского энергорайона и устойчивость Челябинской энергосистемы в целом. При выполнении деления сети высокая вероятность отказа выключателя, что приведет к срабатыванию УРОВ и увеличения объемов отключения в сети.

Исходя из анализа работы АРЛ ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская I,II цепь, сделан вывод о необходимости повышения надежности транзита мощности и управления режимом электрической сети Магнитогорского энергорайона.

III. ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА РАЙОНА ПРИ ПЕРЕВОДЕ ДВУХЦЕПНОЙ ЛЭП С ПЕРЕМЕННОГО НА ПОСТОЯННЫЙ ТОК

В качестве наиболее перспективного средства повышения надежности транзита мощности между ПС 500 кВ Магнитогорская – Смеловская рассмотрен вариант перевода 2-х цепной ВЛ 220 кВ Магнитогорская – Смеловская с переменного на постоянный ток. Внедрение ППТ в Магнитогорский энергорайон не только повысит показатели надежности и устойчивости района, но и позволит управлять режимом сети.

Исследована противоаварийная автоматика для двух вариантов:

- перевод двухцепной линии переменного тока на постоянный с использованием классических преобразователей тока (ПТ) (рис. 5);

- перевод двухцепной цепной линии переменного тока на постоянный с использованием современных преобразователей напряжения (рис. 6).

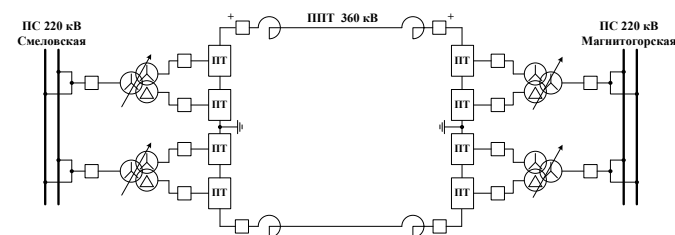


Рис. 5. Схема ППТ 360 кВ Магнитогорская – Смеловская на ПТ

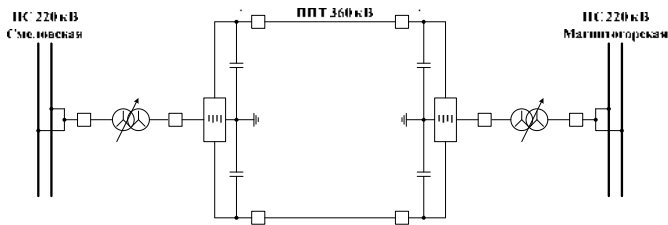


Рис. 6. Схема ППТ 360 кВ Магнитогорская – Смеловская на ПН

Создана математическая модель биполярной ППТ на ПТ в программе MathCad 14.0. Номинальное напряжение между полюсами на стороне постоянного тока рассчитано, исходя из равенства длины пути утечки и уровня изоляции одной цепи ВЛ переменного тока и постоянного тока:

$$U_{НОМ}^{ПОСТ} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_{НОМ}^{ПЕР} \quad (1)$$

В качестве номинального значения напряжения на стороне постоянного тока выбрано $U_{НОМ}=360$ (кВ). Номинальный ток ВЛ переменного тока рассчитан, исходя из экономической плотности тока $j_{ЭК}=1,0$ (А/мм²) и сечения провода АС-300/39:

$$I_{НОМ}^{ПЕР} = j_{ЭК} \cdot S \quad (2)$$

Номинальный ток в цепи постоянного тока рассчитан, исходя из равенства плотности тока:

$$I_{НОМ}^{ПОСТ} = n_{\phi} \cdot I_{НОМ}^{ПЕР} \quad (3)$$

где n_{ϕ} – количество проводов в одной цепи ВЛ переменного тока, равное количеству фаз.

Рассчитанные значения для одной цепи ВЛ переменного и передачи постоянного тока представлены в таблице II.

На основании полученных параметров режима ПТ или ПН на выпрямительной и инверторной подстанциях, рассчитанных в программе MathCad, формируется модель в ПК «RastrWin3» для расчета установившегося режима сети с наличием ППТ на ПТ или ПН (рис. 7).

IV. ВЫВОДЫ

Исходя из анализа различных режимов работы ППТ 360 кВ Магнитогорская – Смеловская в Магнитогорском энергорайоне можно выделить следующие преимущества внедрения ППТ на преобразователях тока:

- широкий диапазон регулирования транзита мощности ПС Магнитогорская – Смеловская при различных схемно-режимных ситуациях (ремонт ВЛ 500 кВ Магнитогорская – Смеловская, ремонт АТГ ПС 500 кВ Смеловская), даже в послеаварийных режимах при отключении КЗ цепи ППТ;

Таблица II. СРАВНЕНИЕ ЦЕПИ ВЛ ПЕРЕМЕННОГО И ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Параметр	Переменный ток	Постоянный ток
Номинальное напряжение, кВ	220	360
Номинальный ток, А	300	900
Номинальная мощность	114,3	324,0 (МВт)
Длительно допустимый ток, А	710	2130
Максимальная мощность	270,5 (МВт)	766,6 (МВт)

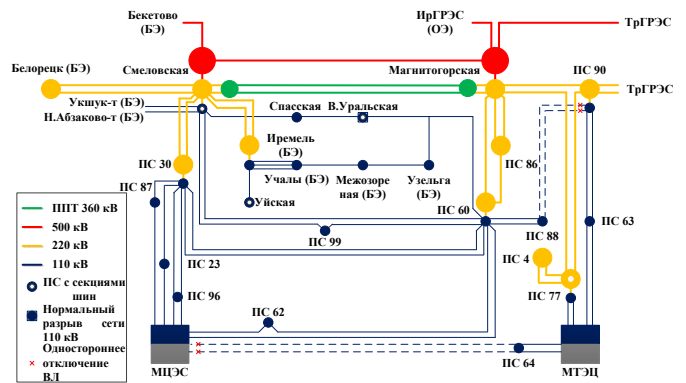


Рис. 7. Схема нормального режима Магнитогорского энергорайона с ППТ 360 кВ Магнитогорская – Смеловская

- уменьшение объема противоаварийной автоматики района, а именно устройств АОПО линий, за счет возможности регулирования токовой загрузки и перетоков ЛЭП прилегающей сети.

Недостатки ППТ на ПТ - высокий уровень потребления реактивной мощности на преобразовательных подстанциях при повышении передаваемой мощности по линии, что приводит к дефициту реактивной мощности сети и, как следствие, снижению уровня напряжений в узлах Магнитогорского энергорайона и необходимости установки компенсирующих устройств.

Преимущества внедрения ППТ на преобразователях напряжения по сравнению с ППТ на ПТ:

- возможность независимого регулирования активной мощности передачи и напряжения на преобразовательных подстанциях;

- широкий диапазон регулирования транзита мощности ПС Магнитогорская – Смеловская и перетоков мощности прилегающей сети в нормальной схеме и при различных схемно-режимных ситуациях при высоком уровне быстродействия.

Список литературы

- [1] Кочкин, В.И. Преобразователь напряжения как управляемый элемент электрических сетей / В.И. Кочкин, М.В. Пешков, Д.В. Романенко // Известия НИИПТ. – 2004. – №60. – С. 128-146.
- [2] Хингорани, Н.Г. Концепции и технологии FACTS / Н.Г. Хингорани, Л. Гюгьи. – Нью Йорк.: IEEE Press, 2000. – С. 432.
- [3] ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – С. 16.
- [4] Виджей К. Суд HVDC and FACTS Controllers: применение статических преобразователей в энергетических системах: Пер. с англ.: НП «НИИА», 2009. – С. 344.
- [5] Розанов, Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – С. 296.
- [6] Ситников, В.Ф. Совершенствование методов и средств управления режимами энергетических систем на основе элементов гибких электропередач (FACTS). – Иваново, 2009.
- [7] Холтз, Й. Широко-импульсная модуляция для электрического преобразователя. – Proc. IEEE, август 1994. – С. 1194-1214.
- [8] Пешков, М.В. Разработка и исследование системы управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем // Диссертация канд. тех. наук. – 2012. – С. 159.