

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ВСТАВКА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

АВТОРЫ:

Ю.А. ДЕМЕНТЬЕВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

П.В. СОКУР,
К.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Ю.Г. ШАКАРЯН,
Д.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

А.В. МАЙОРОВ,
АО «ЭНЕРГОКОМПЛЕКС»

А.М. ШАБАШ,
АО «ЭНЕРГОКОМПЛЕКС»

Д.Н. ЯРОШ,
АО «НТЦ ЕЭС»
(МОСКОВСКОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ)

Н.Д. ПИНЧУК,
К.Т.Н.,
ПАО «СИЛОВЫЕ
МАШИНЫ»

В.С. ТРЕТЬЯКОВ,
ПАО «СИЛОВЫЕ
МАШИНЫ»

Современные мегаполисы
потребляют все больше
и больше электроэнергии

Электромеханическая вставка переменного тока на базе асинхронизированной машины является функциональным аналогом вставки постоянного тока на базе транзисторных преобразователей напряжения.

Ключевые слова: электромеханическая вставка переменного тока; ток короткого замыкания; электрическая машина.



НАЗНАЧЕНИЕ И СТРУКТУРА АСИНХРОНИ- ЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРО- МЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ (АСЭМПЧ)

Концентрированная энергосистема мегаполиса характеризуется значительным электропотреблением, большой величиной генерирующих мощностей и относительно короткими линиями электропередачи класса напряжения 110–500 кВ. Отечественный и мировой опыт показывает, что электропотребление мегаполисов имеет устойчивую тенденцию роста.

В результате уровень токов короткого замыкания (ТКЗ) в сетях 110/220 кВ мегаполисов превышает 63 кА, что выше максимального значения токов отключения для серийно выпускаемых выключателей.

Основным мероприятием для ограничения ТКЗ вынужденно является секционирование сети [1]. В пределах Москвы в сетях 220 кВ насчитывается более 40 точек секционирования, в сетях 110 кВ — около 100. Секционирование сети является эффективным мероприятием по снижению ТКЗ, однако при этом снижается надежность электроснабжения, затрудняется выполнение ремонтов и в целом снижается гибкость управления энергосистемой.

Одним из эффективных устройств для глубокого ограничения ТКЗ является электромеханическая вставка переменного тока на базе асинхронизированных машин АСЭМПЧ,

который представляет собой агрегат, на общем валу которого установлены две асинхронизированные машины [2]. Помимо ограничения ТКЗ АСЭМПЧ может использоваться в качестве гибкой связи между двумя системами, имеющими различные номинальные частоты, или между двумя частями системы с одинаковой номинальной частотой.

Такой агрегат обеспечивает управляемость связи в широких пределах по передаваемой мощности вплоть до ее реверса, позволяет сгладить броски и колебания мощности, передаваемой из одной сети (или одной части сети) в другую, что приводит к локализации возмущений (например, от коротких замыканий). Становится возможным уменьшить объем дополнительных средств регулирования реактивной мощности в широких пределах, в том числе в режимах глубокого потребления реактивной мощности. Кроме того, АСЭМПЧ исключает передачу токов обратной и нулевой последователь-

ности и высших гармоник тока и напряжения из одной сети в другую, т.е. осуществляется гальваническая развязка объединяемых сетей. Можно осуществлять управляемый переток активной мощности в точке включения. Фактически АСЭМПЧ является полным аналогом современной вставки постоянного тока (ВПТ) на полностью управляемых силовых ключах (IGBT-транзисторах).

На рис. 1 изображена принципиальная схема АСЭМПЧ, состоящего из двух асинхронизированных машин (АСМ-1 и АСМ-2).

Если АСМ-1 работает генератором, то АСМ-2 — двигателем, причем при изменении направления потока мощности в силу обратимости электрических машин первая машина перейдет в двигательный режим, а вторая — в генераторный.

Если, например, в одной из энергосистем (ЭС) частота тока $f = 48$ Гц, а в другой $f = 50$ Гц, то вал ротора

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА БАЗЕ ДВУХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИН

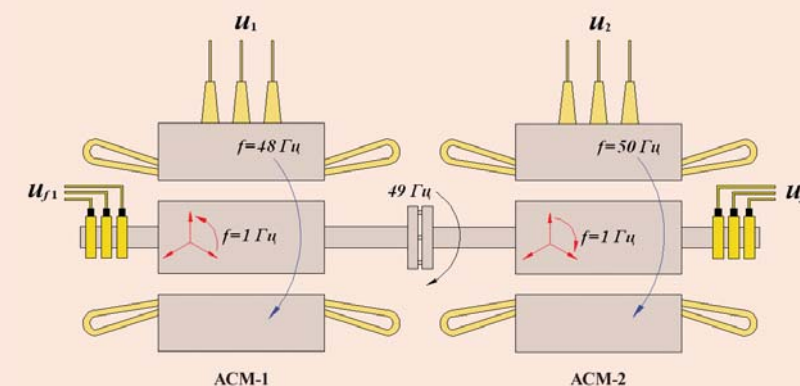


Рис. 1

АСЭМПЧ вращается с частотой, равной полусумме частот (49 Гц). Это достигается за счет вращения поля возбуждения в АСМ-1 против направления вращения вала ротора с частотой 1 Гц и по направлению вращения с частотой 1 Гц в АСМ-2.

Таким образом, АСЭМПЧ позволяет «развязать» энергосистемы 1 и 2 по частоте. Кроме того, АСМ-1 и АСМ-2 позволяют независимо друг от друга регулировать напряжение в каждой из энергосистем, работая в режиме от выдачи до глубокого потребления реактивной мощности.

Если в одной из энергосистем возникнут динамические возмущения (например, короткое замыкание), то они локализируются в этой энергосистеме и не передаются в другую, так как гальваническая связь объединяемых сетей отсутствует.

В случае объединения двух энергорайонов, имеющих одинаковую частоту, ротор вращается с синхронной частотой вращения (или с минимальным скольжением для обеспечения равномерного нагрева обмоток возбуждения).

На данный момент в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» (ранее ВНИИЭ) и ПАО «Силовые машины» (завод «Электросила») существует проработанный вариант АСЭМПЧ, в состав которого входят две установки с номинальной мощностью 2 × 100 МВт (АСЭМПЧ 486/200-8) или 2 × 200 МВт (АСЭМПЧ 486/400-8).

Комплекс АСЭМПЧ содержит следующее основное оборудование (рис. 2):

- блочный повышающий трансформатор (Т1, Т2) — 2 шт.;
- асинхронизированная машина (АСМ-1, АСМ-2) — 2 шт.;
- система возбуждения (СВ-1, СВ-2) с трансформатором возбуждения (Т_{св1}, Т_{св2}) — 2 шт.;

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АСЭМПЧ

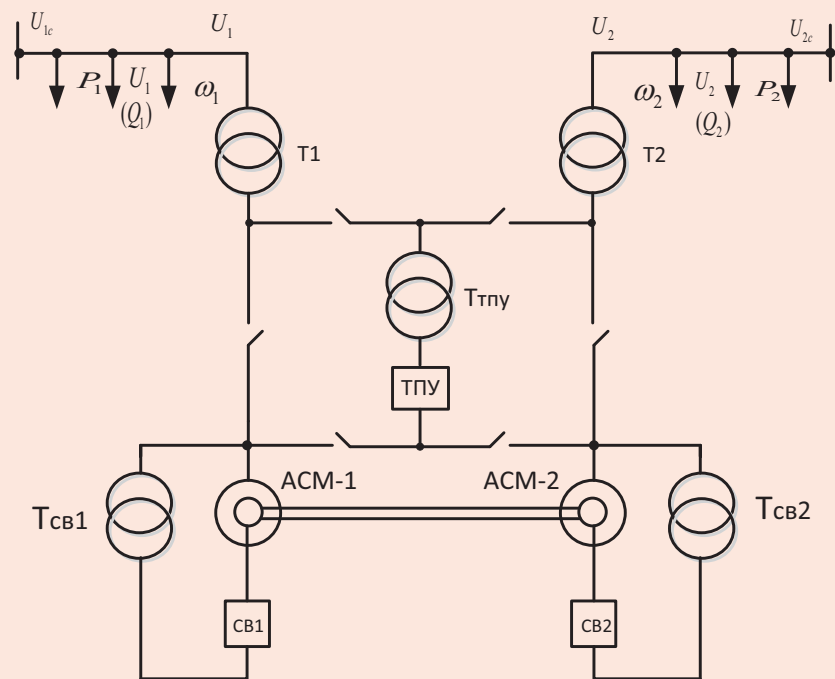


Рис. 2

СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСЭМПЧ И ВПТ

Тип устройства	АСЭМПЧ 486/200-8	ВПТ 100 МВт ПС Могоча	АСЭМПЧ 486/400-8	ВПТ 200 МВт
Номинальная мощность, МВт	100	100	200	200
Номинальный коэффициент мощности	0,85	0,85	0,85	0,85
Возможность кратковременной перегрузки	Да	Нет	Да	Нет
Площадь, занимаемая установкой, м ²	736	2385	736*	4770
Удельная стоимость, долл./кВт	96	250	86	250

* Занимаемая площадь не увеличивается, поскольку увеличение мощности осуществляется за счет увеличения глубины (высоты) устройства.

Таблица 1

ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ АСЭМПЧ МОЩНОСТЬЮ 100 (200) МВт

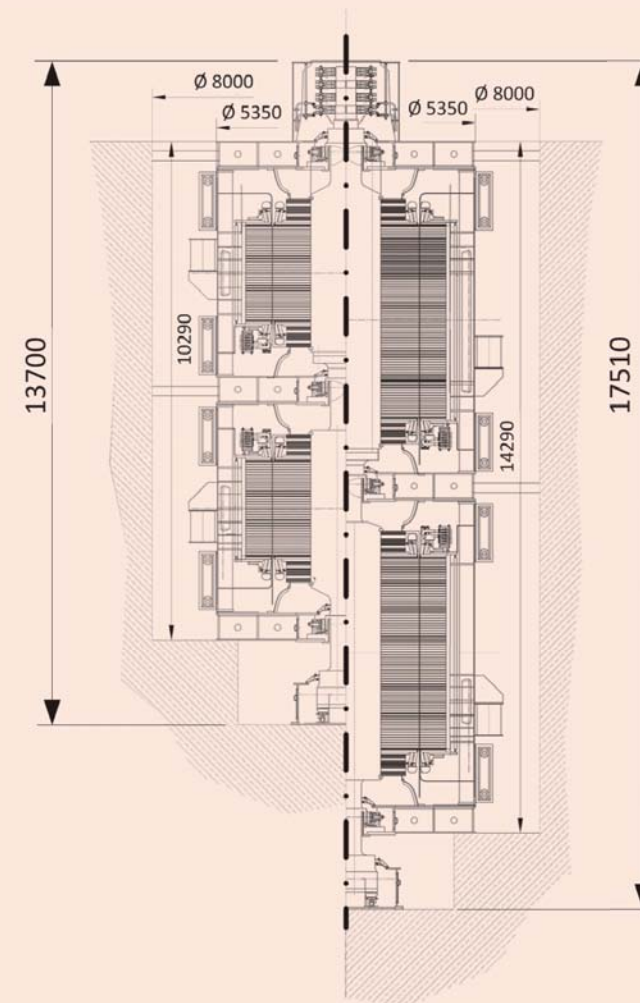


Рис. 3

- тиристорное пусковое устройство (ТПУ) с трансформатором (или реактором) (Т_{тпу}) — 1 шт.

На рис. 3 приведен габаритный чертеж АСЭМПЧ мощностью 100 и 200 МВт. Принципиально машина может быть выполнена и на большую номинальную мощность (300–500 МВт). Генераторы АСЭМПЧ кратковременно допускают двойную перегрузку по току. КПД АСЭМПЧ

несколько ниже, чем у ВПТ. Скорость набора активной мощности сопоставима со скоростью регулирования у ВПТ. Набор активной мощности от нуля до номинальной осуществляется за время не более 0,3 с.

Два агрегата АСЭМПЧ мощностью 100 или 200 МВт, включая дополнительное оборудование (две системы возбуждения с трансформаторами и ТПУ — см. рис. 4), могут

быть размещены в машинном зале с габаритами 46 × 16 м.

Ориентировочная компоновка такой системы для варианта АСЭМПЧ 2 × 200 МВт представлена на рис. 5.

Функциональным аналогом АСЭМПЧ является вставка постоянного тока (ВПТ) — статическое устройство на основе транзисторных преобразователей напряжения (СТАТКОМ) [3]. Компоновка оборудования на ПС 220 кВ Могоча представлена на рис. 6. Общие габариты ВПТ 100 МВт ПС 220 кВ Могоча (без повышающих трансформаторов, с учетом КРУЭ 35 кВ) составляют 53 × 45 м = 2385 м², что на порядок больше чем для АСЭМПЧ. Сравнение основных технико-экономических параметров АСЭМПЧ и ВПТ на примере ПС 220 кВ Могоча приведена в табл. 1.

Остановимся более подробно на свойствах АСЭМПЧ.

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КЗ ПРИ ПОМОЩИ АСЭМПЧ

Для демонстрации возможностей АСЭМПЧ по ограничению токов короткого замыкания была смоделирована связь двух энергорайонов при помощи АСЭМПЧ по схеме, изображенной на рис. 7. При КЗ в любом энергорайоне обнуляется уставка $P_{луст} = 0$. Агрегат работает на холостом ходу с постоянной частотой вращения. Напряжение на шинах АСМ в неповрежденном энергорайоне поддерживается равным уставке $U = U_{уст}$.

Наибольшее значение тока подпитки в точке КЗ на стороне 220 кВ составляет:

- 5,6 кА для АСЭМПЧ мощностью 200 МВт;
- 2,4 кА для АСЭМПЧ мощностью 100 МВт.

На рис. 8 представлены результаты моделирования трехфазного КЗ продолжительностью 0,18 сек в момент времени 0 сек.

РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ АСЭМПЧ

Благодаря асинхронизированному принципу управления АСЭМПЧ обладает возможностью регулировать напряжение в сети за счет регулирования реактивной мощности в широких пределах, в том числе в режимах глубокого потребления реактивной мощности.

Функции управления АСЭМПЧ выполняет автоматический регулятор возбуждения (АРВ) по четырем каналам управления (рис. 9), позволяющим осуществлять регулирование следующих параметров:

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ДВУХ АСЭМПЧ МОЩНОСТЬЮ 100 (200) МВТ

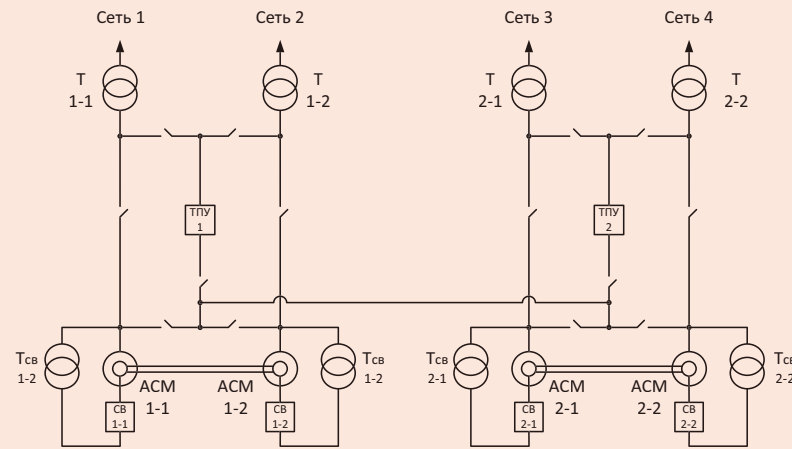


Рис. 4

КОМПОНОВКА АСЭМПЧ МОЩНОСТЬЮ 2 × 200 МВТ

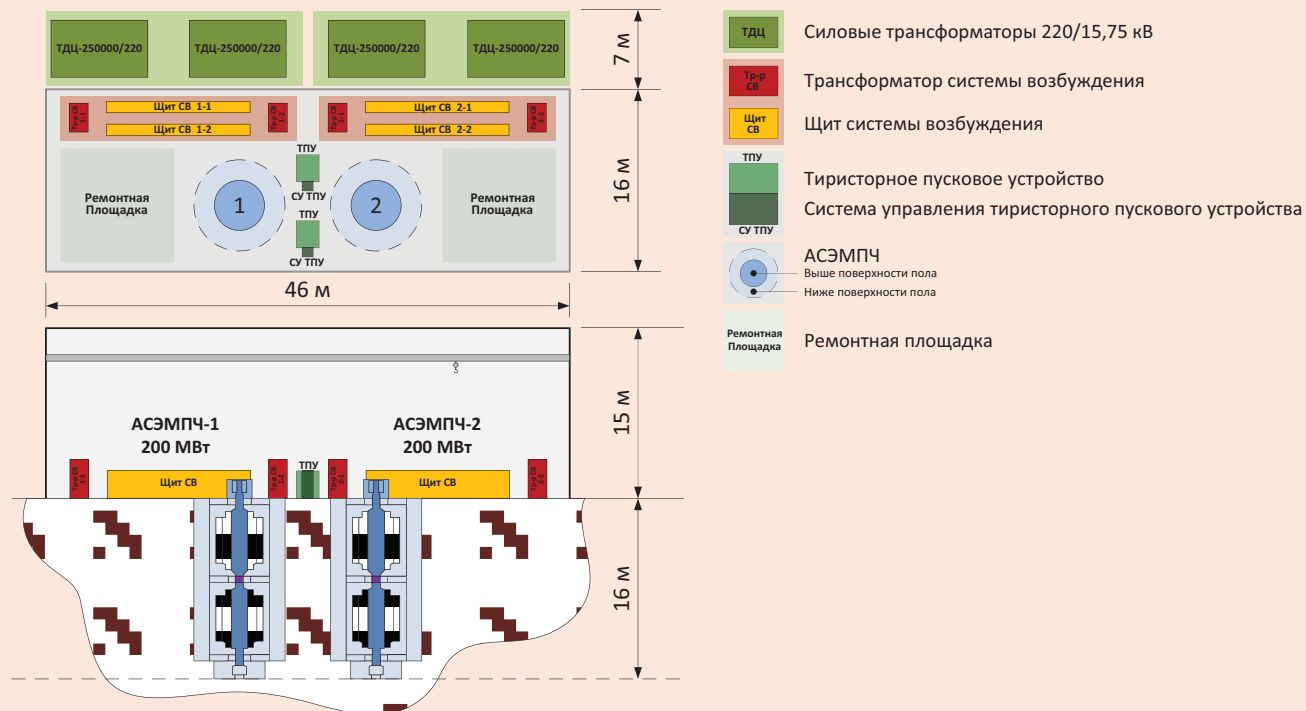


Рис. 5

КОМПОНОВКА ВПТ 100 МВТ НА ПС 220 КВ МОГОЧА

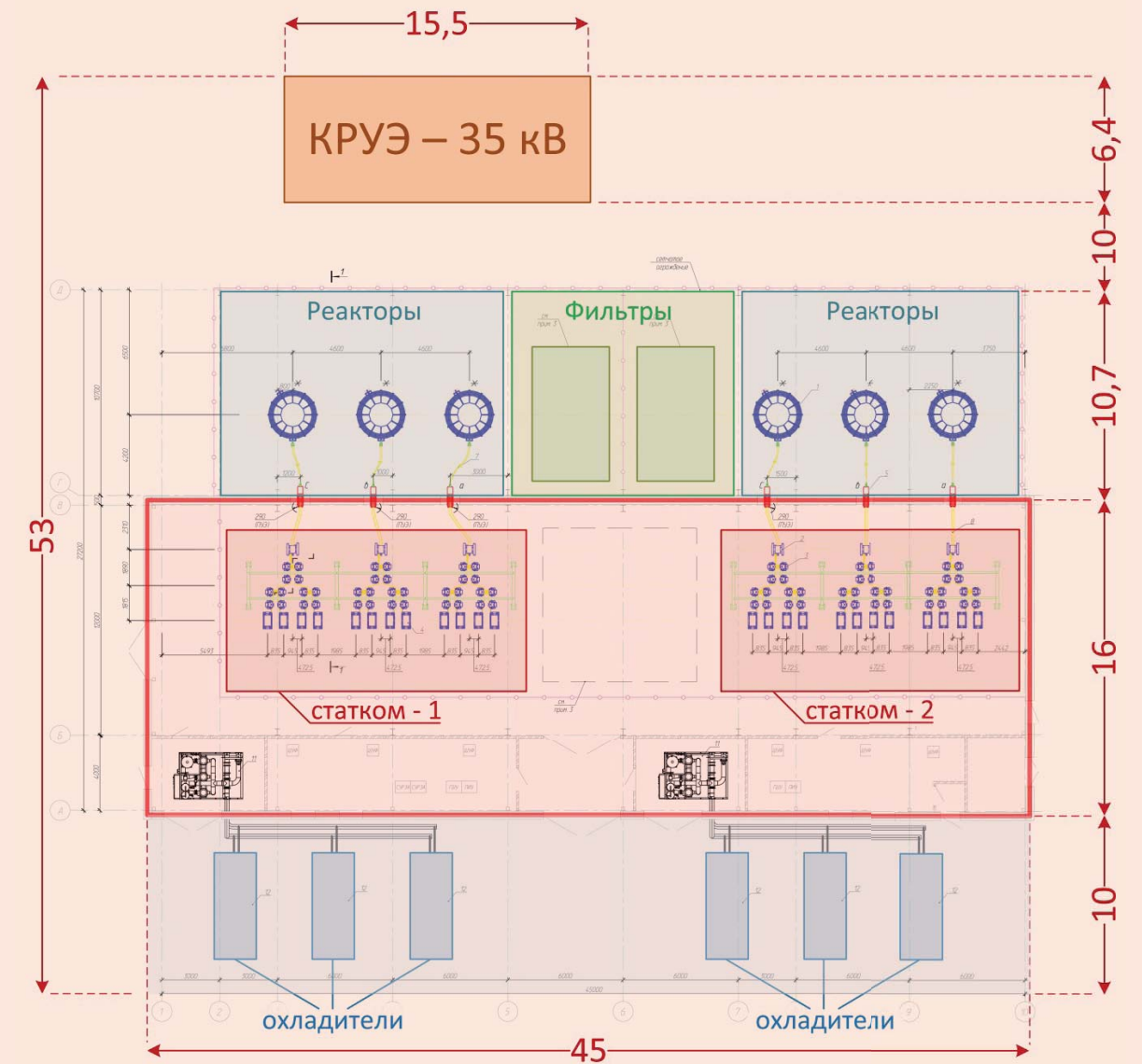


Рис. 6

- переток активной мощности P_l из ЭС-1 в ЭС-2 или обратно;
- напряжение U_1 (реактивная мощность Q_1) в ЭС-1;
- напряжение U_2 (реактивная мощность Q_2) в ЭС-2;
- задание на частоту вращения ротора, равное полусумме частот в ЭС-1 и ЭС-2.

Данное свойство позволяет осуществлять независимое регулирование активной (рис. 10) и реактивной (рис. 11) мощности.

На рис. 12 представлен диапазон работы по реактивной мощности АСЭМПЧ 200 МВт.

ПРИМЕНЕНИЕ АСЭМПЧ В МОСКОВСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Предварительные расчеты показывают, что применение АСЭМПЧ эффективно для установки во вновь сооружаемых транзитах 220 кВ Москвы. Рассматриваемые места установки АСЭМПЧ показаны

СХЕМА АСЭМПЧ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КЗ

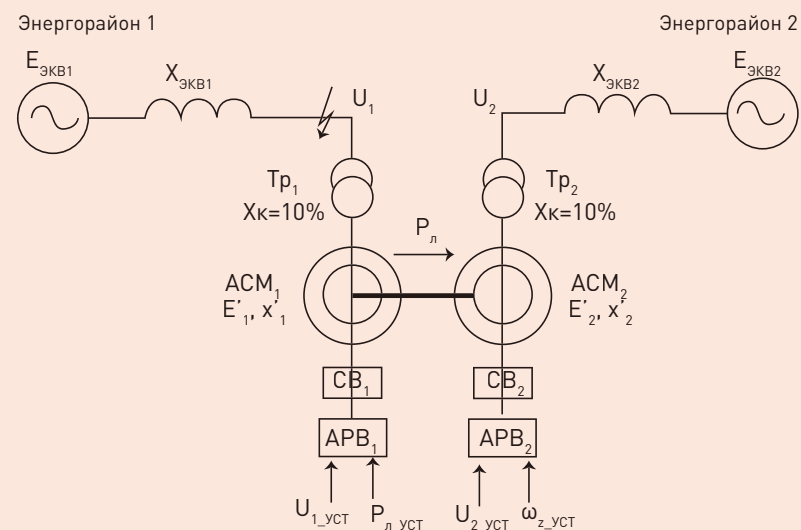


Рис. 7

на рис. 13 и 14. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Анализ перспективного развития высоковольтной сети Московского региона, выполненный при разработке «Схемы и программы перспективного развития электроэнергетики города Москвы на 2014–2019 гг.» [утв. распоряжением ДепТЭХ г. Москвы от 29.04.2014 № 01-01-14-13/14] и «Схемы и программы перспективного развития электроэнергетики Московской области на 2015–2019 гг.» [утв. распоряжением Министерства энергетики Московской области от 29.04.2014 № 24-Р], а также проведенный в работе «Комплексная программа развития электрических сетей напряжением 110 кВ и выше на территории города Москвы и Московской области на период 2014–2019 гг. и до 2025 г.» [Энергосетьпроект, 2014 г. по заказу ОАО «МОЭСК»], показал необходимость применения мероприятий

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО УСТАНОВКЕ АСЭМПЧ В СЕТИ 220 КВ

№	Объект установки	Мощность АСЭМПЧ, МВт	ТКЗ при замыкании транзитов / установке АСЭМПЧ, кА	Нормализация напряжения	Рекомендация к установке
1	ТЭЦ-26 — ПС Битца	2 × 200	60,6/44,7*	Да	Да
2	ПС Горьковская — ПС Цимлянская	2 × 200	42,8/34,6*	Да	Да
3	ТЭЦ-12 — ПС Пресня	2 × 200	68,5/38,1*	Да	Да
4	ПС Магистральная — ПС Белорусская	2 × 200	70,0/51,5*	Да	Да
5	ПС Бескудниково — ПС Гражданская	1 × 200	78,3/66,1*	Да	Нет
6	ТЭЦ-20 — Кожевническая I, II	2 × 200	77,2/48,9*	Да	Да
7	ТЭЦ-23 — Красносельская I, II	2 × 200	77,2/48,9*	Да	Да
8	ТЭЦ-23 — Красносельская №1,2 и ТЭЦ-20 — Кожевническая №1,2	2 × 200 2 × 200	89,8/53,6**	Да	Да

* С учетом тока подпитки от АСЭМПЧ

** Требуется замена ряда выключателей с 40 кА на 63 кА (есть в планах на 2017–2019 гг.)

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КЗ

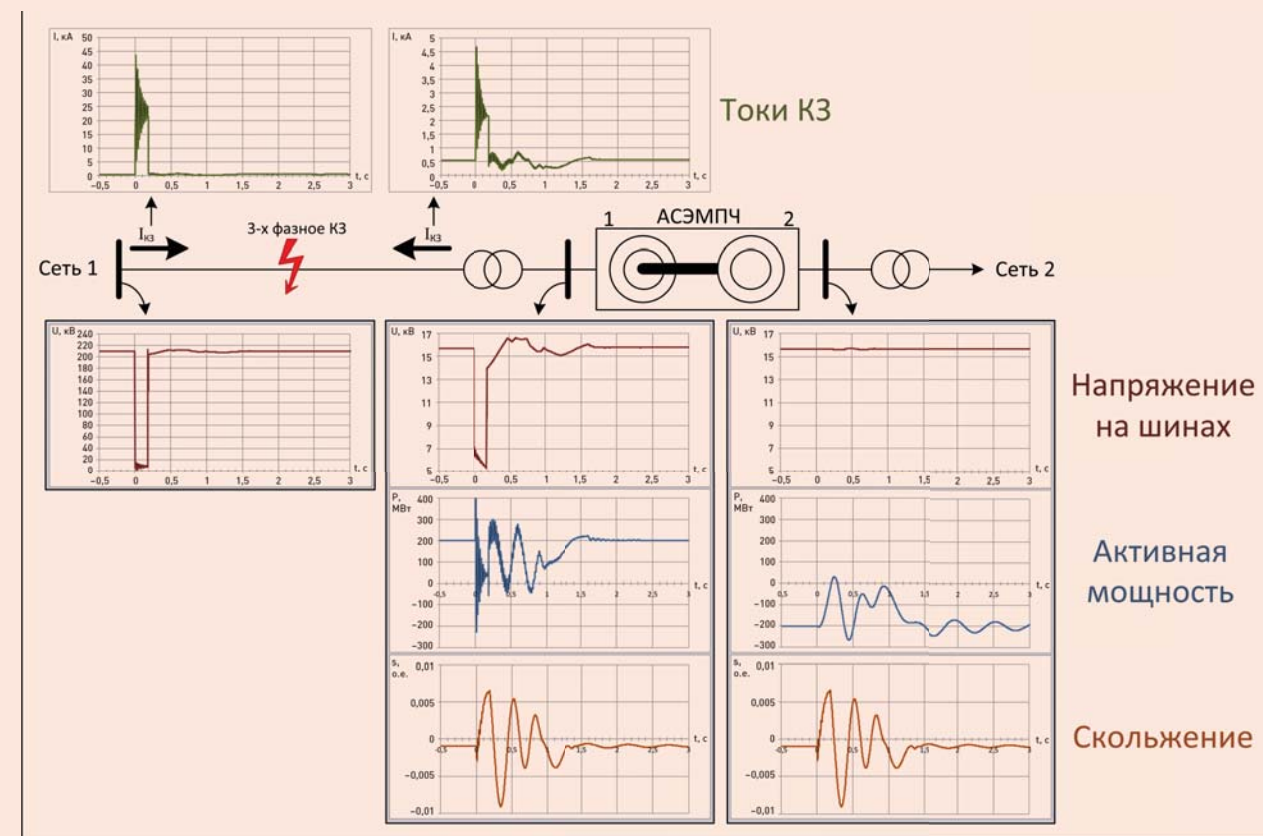


Рис. 8

по ограничению токов короткого замыкания во вновь сооружаемых сетях 220 кВ на территории Новой Москвы в период 2020–2025 гг. (транзит КЛ 220 кВ Никулино — Хованская — Филиппово — Лесная).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Электромеханическая вставка переменного тока на базе асинхронизированных машин является функциональным аналогом вставки постоянного тока на базе транзисторных преобразователей напряжения и обладает следующими основными преимуществами по сравнению с последней:

- отсутствие высших гармоник;
- допустимая кратковременная перегрузка по току до двукратной величины;
- отечественное производство, высокая степень заводской готовности, возможность ПАО «Силовые машины» в сжатые сроки освоить серийное производство основных компонентов АСЭМПЧ: асинхронизированных генераторов, систем возбуждения с векторным управлением, тиристорных пусковых устройств;
- меньшая занимаемая площадь и стоимость по сравнению с ВПТ.

Вышеуказанные конкурентные преимущества позволяют считать

АСЭМПЧ эффективным техническим решением для их применения в энергосистемах, в том числе в энергосистемах мегаполисов.

2. Проведен анализ возможности применения электромеханической вставки переменного тока в энергосистеме мегаполиса на примере Москвы с целью:

- объединения разомкнутых по условиям ТКЗ участков сети 220 кВ;
- осуществления управляемого перетока активной мощности;
- нормализации напряжения за счет регулирования реактивной мощности генераторным оборудованием в составе АСЭМПЧ в широких пределах, в том числе в режимах глубокого

КАНАЛЫ УПРАВЛЕНИЯ АСЭМПЧ

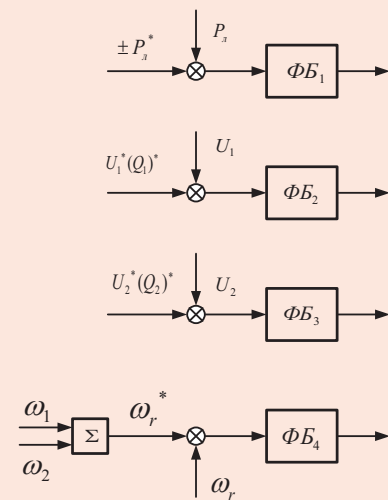


Рис. 9

РЕГУЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

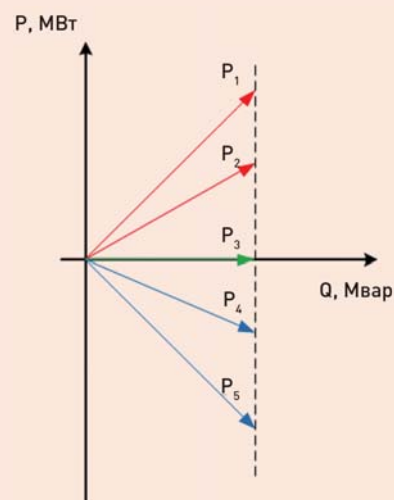


Рис. 10

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

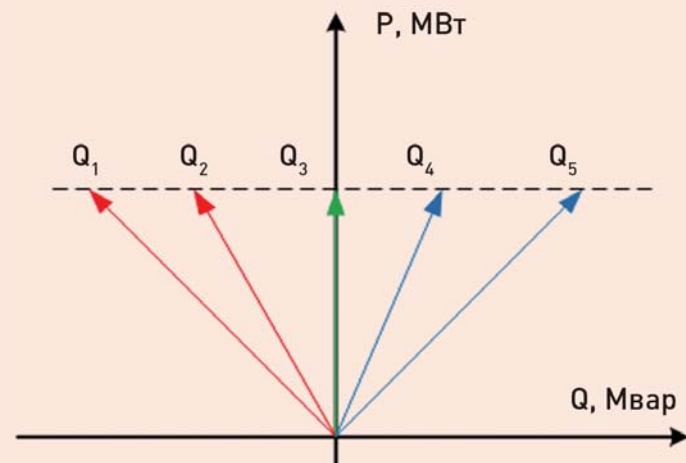
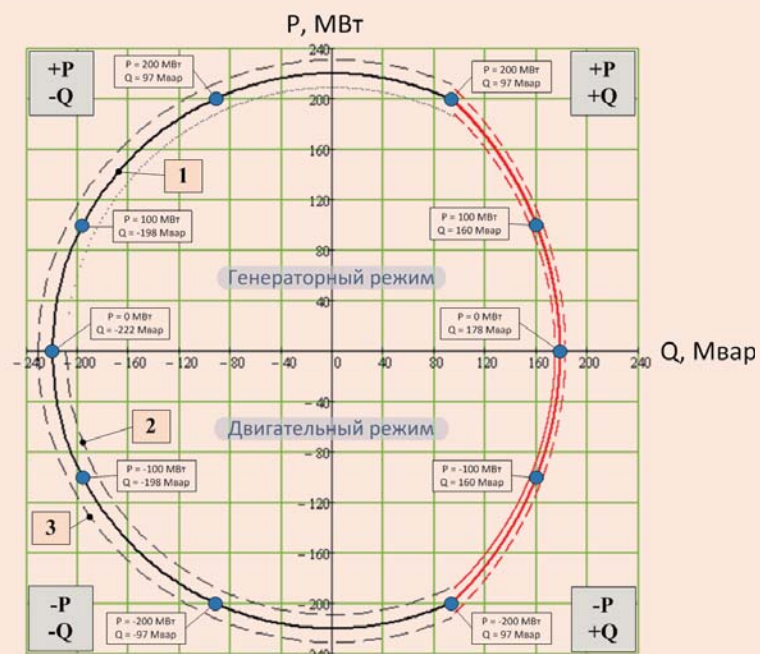


Рис. 11

ОБЛАСТЬ ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ АСЭМПЧ МОЩНОСТЬЮ 200 МВТ



1 — при номинальном напряжении;
2 — при понижении напряжения на 5%;
3 — при повышении напряжения на 5%.

Рис. 12

РАССМАТРИВАЕМЫЕ МЕСТА УСТАНОВКИ АСЭМПЧ: ПС 220 КВ БЕСКУДНИКОВО, ПС 220 КВ МАГИСТРАЛЬНАЯ, ПС 220 КВ ГОРЬКОВСКАЯ, ТЭЦ-12, ТЭЦ-20, ТЭЦ-23



Рис. 13

РАССМАТРИВАЕМЫЕ МЕСТА УСТАНОВКИ АСЭМПЧ: ТЭЦ-26



Рис. 14

потребления реактивной мощности.

3. Намечены объекты возможного применения электромеханических вставок переменного тока на объектах Москвы. При этом в сети 220 кВ энергосистемы Москвы (кольцо КЛ 220 кВ ЦАО Москвы) достигается:
 - ликвидация точек деления в системообразующей сети 220 кВ в местах установки АСЭМПЧ;
 - глубокое снижение тока КЗ в прилегающей сети 220 кВ (порядка 12 кА при установке одного АСЭМПЧ 200 МВА, порядка 30 кА при установке двух АСЭМПЧ, до 45 кА при установке четырех АСЭМПЧ);
 - возможность регулирования напряжения в прилегающей сети за счет регулирования реактивной мощности генерирующим оборудованием в составе АСЭМПЧ в широком диапазоне (в том числе в режимах глубокого потребления) и, как следствие, снижение объема установки ШР на энергообъектах нового кольца КЛ 220 кВ ЦАО Москвы;
 - возможность регулирования перетоков активной мощности в сети 220 кВ;
 - минимизация влияния режимных ограничений сети 220 кВ на режимы работы сети 500 кВ (увеличение допустимых перетоков в сети 500 кВ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Л. Новиков, С.В. Смоловик, Ю.А. Тихонов, Н.Н. Утц, Ю.Г. Шакарня. Проблема токов короткого замыкания в системах электроснабжения мегаполисов и пути ее решения // Энергоэксперт. 2013. № 1.
2. Ю.Г. Шакарня. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоиздат, 1984.
3. И.А. Косолапов, Ю.А. Дементьев. Вставка несинхронной связи для обеспечения параллельной работы объединенных энергосистем Сибири и Востока // Энергия единой сети. 2013. № 5.