

УПРАВЛЯЕМЫЙ ШУНТИРУЮЩИЙ РЕАКТОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

БУЛЫКИН П.Ю., инженер, НПЦ «Энерком-Сервис»

КОЧКИН В.И., д.т.н., НПЦ «Энерком-Сервис»

КУБАРЕВ Л.П., к.т.н., НПЦ «Энерком-Сервис»

ФЕДОСОВ Л.Л., инженер, НПЦ «Энерком-Сервис»

На подстанциях 220 кВ Прогресс и Когалым МЭС Западной Сибири ОАО «ФСК ЕЭС» впервые в России внедрен разработанный НПЦ «ЭНЕРКОМ-СЕРВИС» принципиально новый источник реактивной мощности (ИРМ) 110 кВ, +50/–30 Мвар. ИРМ создан на основе двух конденсаторных батарей 110 кВ 25 Мвар каждая и управляемого тиристорами шунтирующего реактора (УШРТ) 110 кВ, 30 Мвар (рис. 1).

Электрические сети 220 кВ Западной Сибири при достаточной нагрузке активной мощностью линий электропередачи и автотрансформаторов подстанций (ПС) характеризуются дополнительной высокой нагрузкой по реактивной мощности, что приводит к снижению уровней напряжений, особенно в ремонтных и послеаварийных режимах работы, увеличению потерь электроэнергии, а также ограничению передачи активной мощности.

Следует также отметить, что значительная часть нагрузки Тюменского региона представляет собой электрические двигатели газо- и нефтеперекачивающих станций, которая может вызвать лавину напряжения в послеаварийных режимах после отключения к.з. В этой связи от ИРМ требуется высокое быстродействие, которое обеспечивается УШРТ нового типа и которое более чем на порядок выше быстродействия УШР с подмагничиванием [1].

Один из способов быстрого изменения индуктивности реактора – применение в нем, наряду с сетевой обмоткой (СО), вентильной обмотки (ВО) с $e_k = 100\%$, к которой подключен блок управляемых полупроводниковых приборов (тиристорные ключи) или коммутационное устройство [2]. Управляя моментом включения тиристор-

ров, можно практически мгновенно изменять действующее значение тока сетевой обмотки и, следовательно, потребление реактивной мощности в диапазоне от номинального значения (режим короткого замыкания КЗ ВО) до долей процента от номинального значения (режим холостого хода ХХ).

Следует отметить, что предложенное в [2] направление было продолжено компанией ВВС, а позже профессором Александровым Г.Н. [3]. Однако, опубликованные идеи не получили широкого практического внедрения в электрических сетях, возможно по коммерческим соображениям. Специалистам НПЦ «ЭНЕРКОМ-СЕРВИС» удалось развить метод расчета реактора трансформаторного типа с $e_k = 100\%$ и создать оптимизационную компьютерную программу по выбору параметров такого типа реакторов, что позволило снизить затраты на их изготовление и эксплуатацию.

Особенность конструкции реакторов – наличие замкнутой магнитной системы, возможно с небольшими немагнитными зазорами в основных стержнях, и магнитных шунтов, защищающих бак и металлические элементы конструкции от магнитных потоков, замыкающихся вне магнитопровода.

По исполнению магнитной системы и обмоток указанные реакторы близки к конструкциям силовых трансформаторов (ГОСТ 16110-82), методы электромагнитного расчета которых достаточно подробно описаны в [4]. Однако особенности эксплуатационных характеристик реакторов с сетевой и вентильной обмотками (напряжение КЗ пары обмоток до 100%, стремление снизить потери ХХ и КЗ в обмотках и элементах конструкции) требуют определенных корректировок электромагнитного расчета, которые не нашли должного отражения в публикациях.

Кроме того, представляет интерес вывод достаточной простых формул и соотношений, устанавливающих связь геометрических размеров реакторов с их основными параметрами и электромагнитными нагрузками. Такие соотношения особенно полезны на стадии пред-

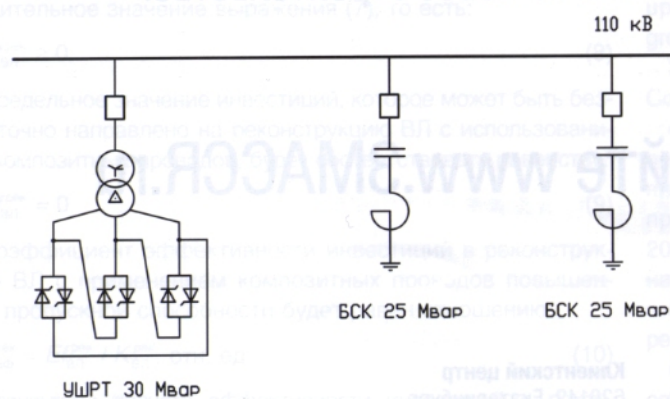


Рис. 1. Схема ИРМ для ПС 220 кВ Когалым и Прогресс

варительного выбора оптимального варианта конструкции реактора.

Рассмотрим однофазный компенсирующий реактор с круглыми СО и ВО, бронестержневым магнитопроводом и замкнутой системой магнитных шунтов для канализации магнитного потока в режиме КЗ ВО (рис. 2 а).

Основным параметром, определяющим габариты и стоимость реактора, является его максимальная мощность в режиме КЗ ВО. Для компенсирующего реактора это по определению номинальная мощность:

$$Q_k = \frac{U_{\text{фСО}}^2}{x_{\text{СО}}}; \quad (1)$$

где $U_{\text{фСО}}$ – напряжение на зажимах реактора, равное наибольшему длительно допустимому фазному напряжению сети, В;

$x_{\text{СО}}$ – индуктивное сопротивление реактора со стороны СО в режиме КЗ ВО, Ом.

Учитывая, что одно из условий работы указанных типов реакторов – отсутствие насыщения стали в любом режиме, номинальное напряжение на зажимах СО принимаем равным напряжению в режиме работы с разомкнутой ВО (аналогичном режиму XX силовых трансформаторов), которое определится как:

$$U_{\text{фСО}} = 2\pi f \cdot w_{\text{СО}} \cdot \frac{B_{\text{стм}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi D_{\text{ст}}^2}{4} \cdot k_{\text{ст}}, \quad (2)$$

где f – частота, Гц;

$w_{\text{СО}}$ – число витков сетевой обмотки;

$B_{\text{стм}}$ – амплитуда индукции в стали магнитопровода, Тл;

$D_{\text{ст}}$ – диаметр стержня магнитопровода, м;

$k_{\text{ст}}$ – коэффициент заполнения сталью.

Индуктивностью реактора является индуктивность рассеяния в опыте КЗ пары обмоток:

$$x_{\text{СО}} = \omega L_{\text{СО}} = 2\pi f \cdot \mu_0 \cdot w_{\text{СО}}^2 \cdot \frac{S_{\text{рас}}}{h_{\text{ок}}}, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м;

$h_{\text{ок}}$ – высота окна магнитопровода (в двухстержневом реакторе – удвоенная), принятая совпадающей с длиной силовых линий поля рассеяния, (т.к. радиальный размер обмоток и канала между обмотками заведомо больше зазора между торцом обмоток и магнитными шунтами), м;

$S_{\text{рас}}$ – площадь канала рассеяния в предположении, что радиальные размеры обмоток не сильно отличаются друг от друга:

$$S_{\text{рас}} = \pi (D_{\text{ст}} + 2\Delta_{\text{с-во}} + 2b_{\text{ВО}} + b_k) \cdot \left(b_k + \frac{b_{\text{ВО}} + b_{\text{СО}}}{3} \right), \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{с-во}}$ – радиальный размер изоляционного канала между стержнем и ВО, м;

$b_{\text{ВО}}, b_{\text{СО}}$ – радиальные размеры ВО и СО, м;

b_k – радиальный размер изоляционного канала между ВО и СО, м.

Радиальные размеры обмоток в первом приближении можно оценить, используя значения коэффициентов заполнения обмоток материалом провода из близких аналогов обмоток, используемых в силовых трансформаторах, по формулам:

$$\begin{aligned} I_{\text{СО}} \cdot w_{\text{СО}} &= J_{\text{СО}} \cdot h_{\text{СО}} \cdot b_{\text{СО}} \cdot k_{\text{СО}}, \\ I_{\text{ВО}} \cdot w_{\text{ВО}} &= J_{\text{ВО}} \cdot h_{\text{ВО}} \cdot b_{\text{ВО}} \cdot k_{\text{ВО}}, \end{aligned} \quad (5)$$

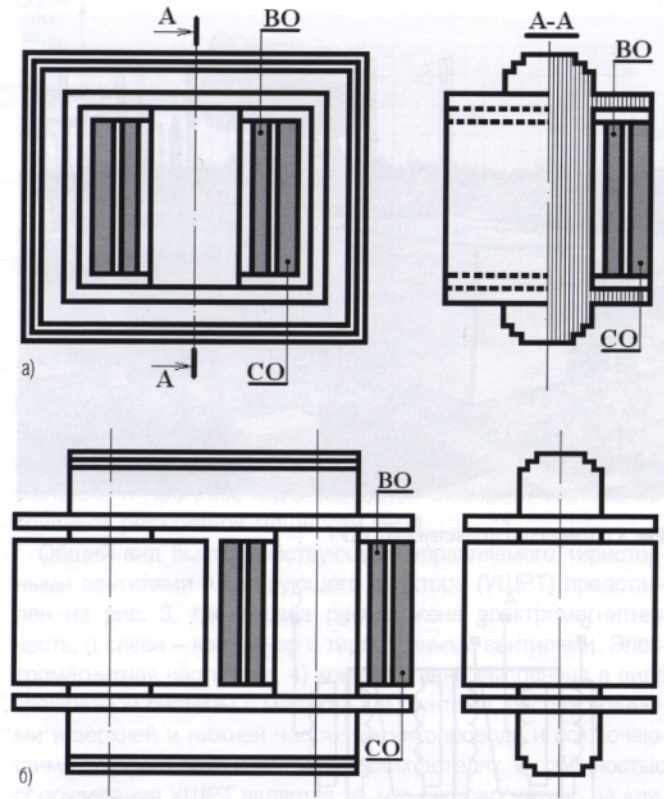


Рис. 2. а – бронестержневой реактор (БСТ); б – двухстержневой реактор (2СТ)

где $I_{\text{СО}}, I_{\text{ВО}}$ – номинальные токи в СО и ВО, А;

$J_{\text{СО}}, J_{\text{ВО}}$ – плотность тока в СО и ВО, А/м²;

$h_{\text{СО}}, h_{\text{ВО}}$ – высота обмоток, м;

$k_{\text{СО}}, k_{\text{ВО}}$ – коэффициенты заполнения обмоток.

Принимая высоты ВО и СО одинаковой и равной $h_{\text{оэм}}$, учитывая равенство ампер-витков обмоток в режиме КЗ ВО и подставляя в (5) значение $w_{\text{СО}}$ из (2), получим:

$$\begin{aligned} b_{\text{ВО}} &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{U_{\text{фСО}} \cdot I_{\text{СО}}}{f \cdot B_{\text{стм}} \cdot J_{\text{ВО}} \cdot h_{\text{оэм}} \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_{\text{ВО}}} \cdot \frac{1}{D_{\text{ст}}^2}, \\ b_{\text{СО}} &= \frac{J_{\text{ВО}} \cdot k_{\text{ВО}}}{J_{\text{СО}} \cdot k_{\text{СО}}} \cdot b_{\text{ВО}}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$h_{\text{оэм}} = h_{\text{ок}} - 2\Delta_{\text{о-я}}$$

где $\Delta_{\text{о-я}}$ – размер изоляционного канала между торцами обмоток и ярами, м.

Подставляя в (1) значения (2) и (3), с учетом (4) и (6), при $J_{\text{СО}} = J_{\text{ВО}}$, получим уравнение для определения диаметра стержня и высоты окна магнитопровода по заданным значениям номинальных параметров, электромагнитных нагрузок и размеров основных изоляционных промежутков:

$$\begin{aligned} &A_1 \cdot h_{\text{ок}} \cdot D_{\text{ст}}^4 - \pi \left(D_{\text{ст}} + 2\Delta_{\text{с-во}} + b_k + \frac{A_2}{(h_{\text{ок}} - 2\Delta_{\text{о-я}}) \cdot D_{\text{ст}}^2} \right) \times \\ &\times \left(b_k + \frac{A_2 \cdot (1 + k_{\text{ВО}} / k_{\text{СО}})}{6(h_{\text{ок}} - 2\Delta_{\text{о-я}}) \cdot D_{\text{ст}}^2} \right) = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где для компенсирующих и шунтирующих реакторов:

$$A_1 = \frac{\pi^2}{64} \cdot 10^7 \cdot \frac{f B_{\text{стм}}^2}{Q_{\text{max}}} \cdot k_{\text{ст}}^2, \quad 1/\text{м}^3,$$



Рис. 3. Общий вид быстродействующего УШРТ

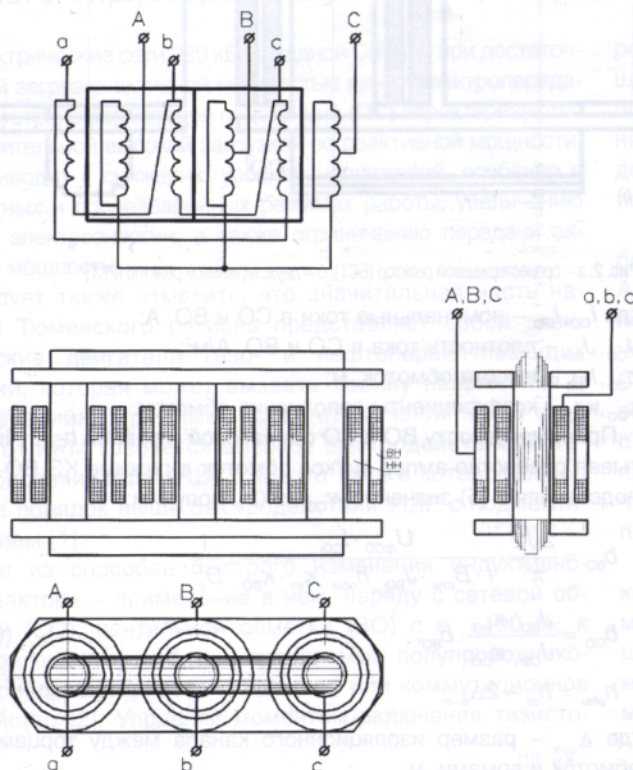


Рис. 4. Электромагнитная часть УШРТ

$$A_2 = \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{Q_{\max}}{f B_{\text{ст}} \cdot J_{\text{ВО}} \cdot K_{\text{ст}} \cdot K_{\text{ВО}}}, \text{ м}^4 \quad (8)$$

Определенные по (7) взаимосвязанные значения диаметра стержня и высоты окна магнитопровода, а по (6) значения радиальных размеров обмоток позволяют провести оценочный электромагнитный расчет реакторов при разных значениях диаметра стержня магнитопровода и выбрать его оптимальный диаметр.

Наличие небольших по высоте немагнитных зазоров в стержне магнитопровода не очень заметно влияет на выбор его диаметра. Для расчетов необходимо в

правую часть (2) ввести коэффициент потокоцепления $K_{\Psi} = 1,01 - 1,03$, учитывающий отличие среднего потока в витках обмотки от наибольшего потока в стержне магнитопровода. В числитель правой части A_1 и знаменатель правой части A_2 (8), (9) подставляем соответственно K_{Ψ}^2 и K_{Ψ} . Однако наличие зазоров приводит к увеличению намагничивающей мощности реактора в режиме его работы с разомкнутой ВО.

Диапазон изменения мощности реактора (глубина регулирования $K_{\text{рег}}$) – отношение его максимальной мощности в режиме КЗ ВО к намагничивающей мощности зазоров ($Q_{\text{магн}}$) равен:

$$K_{\text{рег}} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{магн}}} = \frac{x_{\text{магн}}}{x_{\text{СО}}} = \frac{S_{\text{заз}}}{S_{\text{рас}}} \cdot \frac{h_{\text{ок}}}{l_{\text{заз}\Sigma}}, \quad (10)$$

где $S_{\text{заз}}$ – площадь сечения зазора с учетом «выпучивания» магнитного поля на величину, примерно равную высоте единичного зазора – $l_{\text{заз}}$:

$$S_{\text{заз}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{ст}} + 2l_{\text{заз}})^2, \quad (11)$$

$l_{\text{заз}\Sigma}$ – суммарная высота зазоров на стержень, м.

Влияние величины зазоров на глубину регулирования мощности реакторов можно оценить по (10) с учетом (4), (7) и (11) при конкретных значениях их параметров и размеров.

Для канализации магнитного потока в режиме короткого замыкания ВО применяется система магнитных шунтов, конструкция которых аналогична конструкции магнитных систем броневых или яровых реакторов [4]. Площадь сечения магнитных шунтов определяется площадью канала рассеяния за вычетом доли магнитного потока рассеяния, входящего в яма основного магнитопровода.

В бронестержневом однофазном реакторе активное сечение каждого из двух замкнутых шунтов можно оценить как:

$$S_{\text{ш}} = \frac{1}{4} \frac{B_{\text{ос}}}{B_{\text{ш}}} \frac{S_{\text{рас}}}{1 + 0,5(S_{\text{рас}}/S_{\text{рас.ш}} - 1)}, \quad (12)$$

где $B_{\text{ос}}$ – индукция осевого поля в канале рассеяния, вычисленная по номинальным ампервиткам, деленная на высоту окна;

$B_{\text{ш}}$ – наибольшая индукция в стали магнитного шунта;

$S_{\text{рас.ш}}$ – часть площади канала рассеяния, находящаяся в зоне магнитных шунтов (площадь двух кольцевых сегментов).

В целях снижения массы магнитных шунтов и торцевых ям в компенсирующих и шунтирующих реакторах иногда рассматривают применение некруглых (овальных) обмоток. Для упрощения анализа представим описанный овал стержня фигурой из двух полуокружностей диаметром $D_{\text{ст}}$, соединенных прямыми линиями длиной $\alpha D_{\text{ст}}$. Площадь геометрического сечения стержня определяется как:

$$S_{\text{ст}} = \alpha D_{\text{ст}}^2 + \frac{\pi}{4} D_{\text{ст}}^2 = (\alpha + \pi/4) D_{\text{ст}}^2,$$

а средний периметр канала рассеяния:

$$l_{\text{рас}} = \pi (D_{\text{ст}} + 2\Delta_{\text{с-ВО}} + 2b_{\text{ВО}} + b_{\text{к}}) + 2\alpha D_{\text{ст}}.$$

В этом случае уравнение для определения сторон сечения стержня и высоты окна магнитопровода вместо (7) принимает вид:

$$\begin{aligned}
 & (1 + 4\alpha / \pi)^2 A_1 \cdot h_{ок} \cdot D_{ст}^4 - \\
 & - \left[2\alpha D_{ст} + \pi \left(D_{ст} + 2\Delta_{с-во} + b_k + \frac{A_2 / (1 + 4\alpha / \pi)}{(h_{ок} - 2\Delta_{о-р})} \cdot D_{ст}^2 \right) \right] \times \\
 & \times \left(b_k + \frac{A_2 (1 + \kappa_{во} / \kappa_{со}) / (1 + 4\alpha / \pi)}{6(h_{ок} - 2\Delta_{о-р}) D_{ст}^2} \right) = 0, \quad (13)
 \end{aligned}$$

где значения A_1 и A_2 взяты из (8).

Очевидно, что при $\alpha = 0$ (сечение – круг), указанное уравнение тождественно (7).

Апробация данного метода электромагнитного расчета проводилась при проектировании компенсирующего реактора типа РКТВДЦ – 30000/110 для быстродействующих источников реактивной мощности в электрических сетях Западной Сибири.

В соответствии с исходными данными и результатами расчетов были выбраны: диаметр стержня магнитопровода – 0,4 м, высота окна – 1,55 м, ширина канала между ВО и СО – 0,085м. Оптимизационные расчеты по [5] с последующей раскладкой обмоток, уточнением основных и добавочных потерь и проверкой импульсной прочности показали полное соответствие выбранной конструкции техническим требованиям на проектирование при близкой к минимуму полной массы реактора и его стоимости.

Изготовленные в соответствии с разработанным комплектом конструкторской документации два реактора успешно прошли приемо-сдаточные испытания и с октября

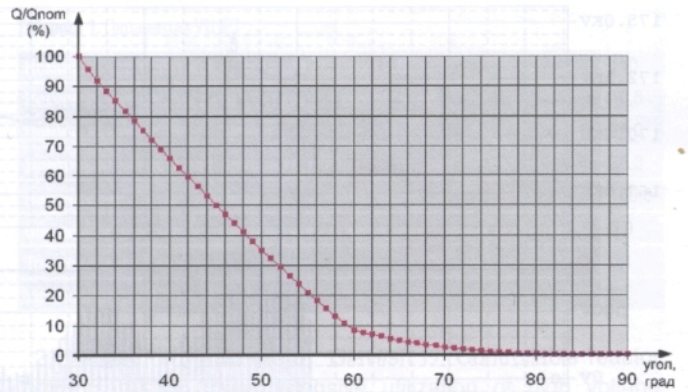


Рис. 5. Регулировочная характеристика УШРТ

2009 года введены в эксплуатацию на подстанциях 220 кВ Когалым и Прогресс МЭС Западной Сибири в составе источников реактивной мощности ИРМ.

Общий вид быстродействующего управляемого тиристорными вентилями шунтирующего реактора (УШРТ) представлен на рис. 3, где справа расположена электромагнитная часть, а слева – контейнер с тиристорными вентилями. Электромагнитная часть (рис. 4) конструктивно выполнена в виде трехфазной системы с магнитными шунтами, расположенными в верхней и нижней частях магнитопровода и исключающими потери в баке и металлических деталях. Особенностью оборудования УШРТ является то, что оно рассчитано на климатическое исполнение УХЛ (от – 60 °С до + 40 °С).

Регулировочная характеристика УШРТ приведена на рис. 5.

ВЫСТАВКА



В РАМКАХ ВЫСТАВКИ



ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ХОЗЯЙСТВА
- ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
- ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
- ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ
- СВЕТОТЕХНИКА. АРХИТЕКТУРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

EPIS

4-6 ОКТЯБРЯ 2011 • г. КРАСНОДАР
ВЦ «КРАСНОДАРЭКСПО»

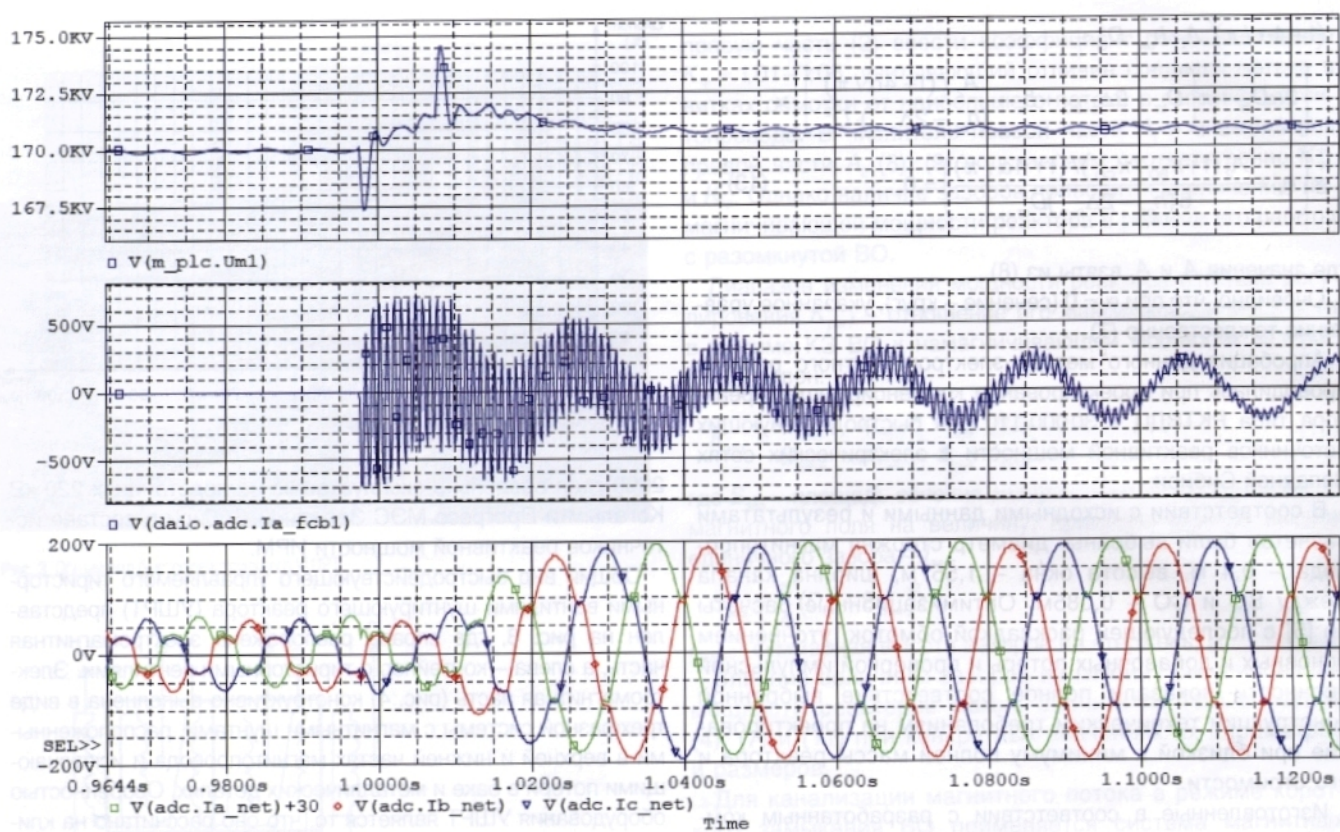
МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

«ИНФРАСТРУКТУРА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЮГА РОССИИ»

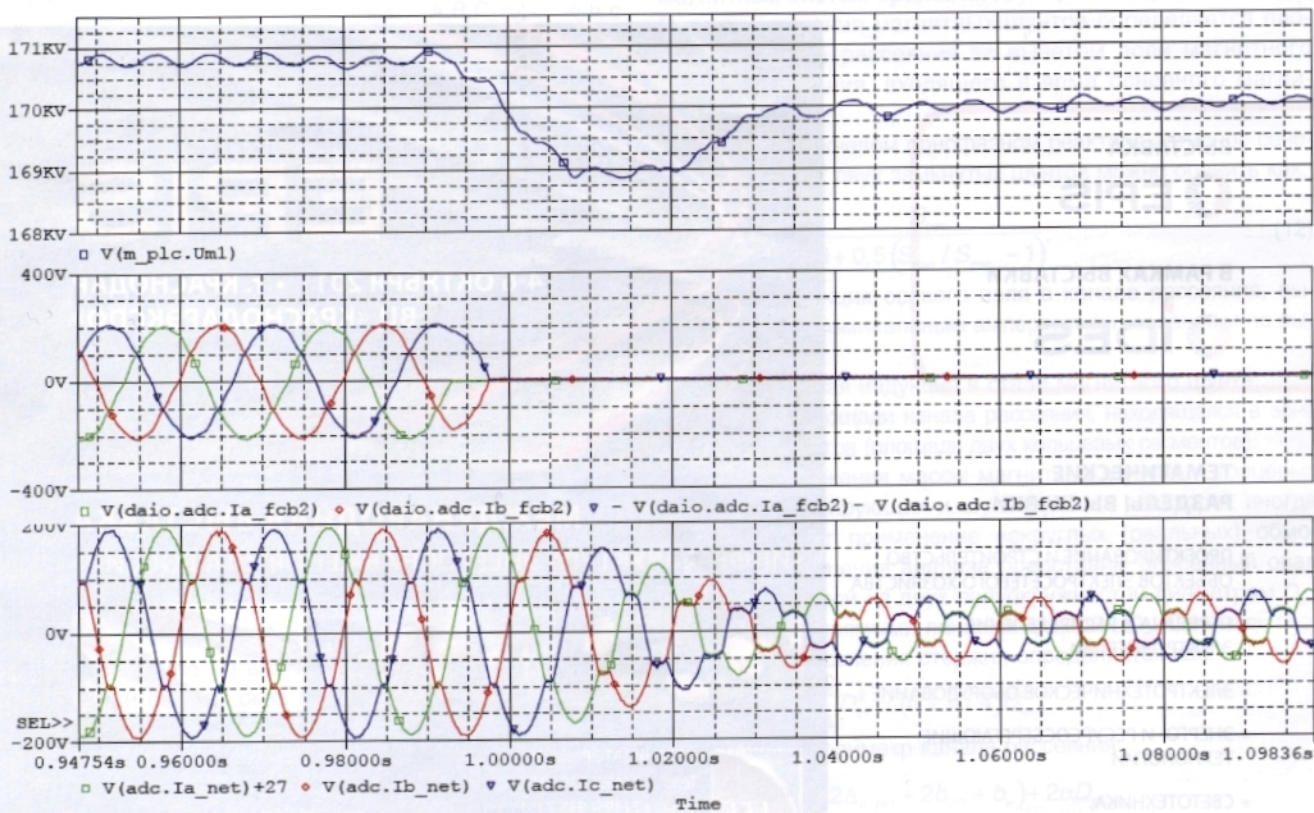


ОРГАНИЗАТОР
Тел.: +7 (495) 935 7350
Факс: +7 (495) 935 7351
E-mail: ides@ite-expo.ru

WWW.IDES-EXPO.RU



ПП при включении БСК. Быстродействие ПИД = 30 мс



ПП при отключении БСК. Быстродействие ПИД = 30 мс

Рис. 6. Быстродействие УШРТ в замкнутой системе регулирования при коммутации на шинах 110 кВ конденсаторной батареи

Проведенные заводские и натурные испытания подтвердили заявленные параметры (табл. 1) и высокое быстродействие УШРТ (рис. 6) в замкнутой системе регулирования при коммутации на шинах 110 кВ батареи статических конденсаторов (БСК).

Таким образом, УШРТ в составе ИРМ обеспечивает плавное с высоким быстродействием регулирование мощности устройства, а входящие в состав ИРМ конденсаторные батареи позволяют расширить диапазон регулирования до 80 Мвар от 30 Мвар потребления до 50 Мвар генерации реактивной мощности.

В настоящее время ИРМ, установленные на ПС 220 кВ Когалым и Прогресс, работают без замечаний, стабилизируют напряжение на шинах 110 кВ в соответствии с уставками Тюменского РДУ, разгружая линии от дополнительной реактивной мощности и в силу своего быстродействия повышают устойчивость энергосистемы, снижая вероятность лавины напряжения в соответствующих узлах нагрузки МЭС Западной Сибири.

ЛИТЕРАТУРА

1. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сб. статей под ред. А. М. Брянцева. Москва, Знак, 2004 г.

Таблица 1. Параметры УШРТ

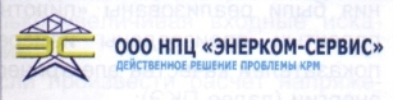
Номинальное напряжение сетевой обмотки, кВ	110
Номинальное напряжение вентильной обмотки, кВ	10,5
Номинальная мощность, Мвар	25,0
Длительно допустимая мощность, Мвар	30,0
Напряжение КЗ при 30 Мвар, %	100,0
Общие фактические потери, включая потери в тиристорных вентилях, %	0,9
Ток холостого хода, %	0,1
Уровень шума в режиме КЗ, дБ А	88

2. Reichert K., Kaufertle J., Glavitsch H. Controllable reactor compensator for more extensive utilization of high voltage systems // CIGRE. 25 Session. Report 32-07. 1974

3. Александров Г.Н., Луин В.П. Управляемые реакторы. Санкт-Петербург, 2001 г.

4. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов // Москва. Энергия. 1981.

5. Кочкин В.И., Крайнов С.В., Кубарев Л.П., Федосов Л.Л. Программа электромагнитного расчета трехфазных компенсирующих реакторов трансформаторного типа // Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009615642. 2009.



ООО НПЦ «Энерком-Сервис»
115201, г. Москва, Каширское шоссе, 22, к.3.
Тел.: (499) 613-83-63, (499) 613-68-54
www.enercomserv.ru

ПРАВИТЕЛЬСТВО УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
АДМИНИСТРАЦИЯ ГОРОДА ИЖЕВСКА
АНО «АГЕНТСТВО ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ»
УДМУРТСКАЯ ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР «УДМУРТИЯ»



ПОД ПАТРОНАЖЕМ ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ПАЛАТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПРИГЛАШАЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ К УЧАСТИЮ В ВЫСТАВКЕ!

II Всероссийская специализированная выставка
**Энергетика.
Энергосбережение**

25-28 октября/ 2011

ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ

- Производство электрической и тепловой энергии
- Преобразование, передача и распределение энергии
- Теплоснабжение
- Альтернативные источники энергии
- Светотехника
- Проектирование. Инжиниринг. Консалтинг. Энергоаудит. Программные комплексы
- Энергоресурсосбережение
- Энергетическая безопасность
- Приборы учета и контроля тепла, энергии, газа, воды, применяемые в быту

Место проведения: г. Ижевск, ул. Кооперативная, 9 (ФОЦ «Здоровье»)
тел./факс: (3412) 733-585, 733-587, 733-591, 733-664, доб. 1146, 1178
e-mail: energy@vcudmurtia.ru; www.energy.vcudm.ru



Генеральный информационный партнер:

репутация

Генеральный партнер деловой программы:

333 энергетико-энергосберегающая экология



Информационные партнеры:

ОБОРУДОВАНИЕ

ПРОМЫШЛЕННЫЙ

Электротехники

НИЖЕГОРОДСКИЙ КОММЕРСАНТ

Энергетика

Энергетик и теплотехник

Интернет-спонсоры:

ROSFIRM.ru

PromPortal.ru

База-Ан

SafeProm.ru