

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ синхронных компенсаторов в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии

АВТОРЫ:

Ю.Д. ВИНИЦКИЙ, Д.Т.Н.,
ООО «ИНТЕР РАО –
ИНЖИНИРИНГ»

В.А. КУЗЬМИЧЕВ, К.Т.Н.,
ФИЛИАЛ АО «ИНСТИТУТ
ГИДРОПРОЕКТ» —
«НИИЭС»

Исследовательский комитет СИГРЭ А1 «Вращающиеся электрические машины» объединяет ведущих международных экспертов по данной тематике.

В 23 рабочих группах ИК А1 работают представители 36 стран. Всего в мире экспертов порядка 280. в области вращающихся электрических машин

Ключевые слова: возобновляемая энергетика; возобновляемые источники энергии; СИГРЭ; международное сотрудничество; Вращающиеся электрические машины; синхронные компенсаторы.



Асинхронизированный синхронный турбогенератор ТЗФАУ-160-2У3 мощностью 160 МВт

ВВЕДЕНИЕ

В ходе 48-й сессии СИГРЭ [1, 2] проходившей в онлайн-формате с 18 по 27 августа 2021 г., на заседаниях исследовательского комитета А1 «Вращающиеся электрические машины» большое внимание уделили вопросу применения синхронных компенсаторов (СК) в электрических сетях будущего, в которых значительная часть передаваемой энергии будет вырабатываться на солнечных и ветровых электростанциях.

По мнению экспертов СИГРЭ, уменьшение доли традиционных тепловых электростанций в структуре генерирующих мощностей приведет к дефициту реактивной мощности в электрических сетях, что, в свою очередь, негативно скажется на их динамической и статической устойчивости.

Традиционно для управления перетоками реактивной мощности и поддержания требуемого уровня напряжения в электрических сетях использовались СК. В последние десятилетия большую часть из них заменили на статические устройства: системы накопления энергии с использованием аккумуляторных батарей (АБ); батареи статических конденсаторов (параллельная компенсация), в том числе с контактным или бесконтактным переключением конденсаторов; управляемые шунтирующие реакторы; управляемые тиристорные компенсаторы; СТАТКОМ.

Накопленный опыт эксплуатации статических компенсирующих устройств, режимные требования со стороны энергосистем привели к дискуссиям о предпочтительных схемно-аппаратных решениях по повышению динамической устойчивости энергосистем и стабилизации напряжения при резко переменной в течение суток нагрузки, которые активно велись

и на 44–47-й сессиях СИГРЭ. На 48-й сессии СИГРЭ эти дискуссии были продолжены. В трех из 26 докладов, представленных на сессии, описаны варианты исполнения СК и практической реализации комбинированных компенсирующих устройств, в том числе для конкретных энергосистем.

В настоящей статье по материалам докладов на 48-й сессии СИГРЭ приведены результаты сравнительного анализа возможностей статических и электромеханических устройств компенсации реактивной мощности, описаны новейшие конструктивные решения и параметры современных мощных электромеханических компенсирующих устройств, показана целесообразность разумного сочетания совместного использования статических и электромеханических устройств.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В докладе А1-102 «Преимущества применения синхронных компенсаторов в электрических сетях с высокой долей возобновляемых источников энергии» (H. Biellmann, M. Buquet, P. Chay, A. Schwery, V. Costan, J. L. Drommi, G. Prime, Швейцария, Франция) сообщается о том, что в последние десятилетия на рынке предложен ряд статических устройств компенсации реактивной мощности наряду с электромеханическими системами компенсации.

К статическим устройствам компенсации относятся:

ПОДКОМИТЕТ А1 РНК СИГРЭ «ВРАЩАЮЩИЕСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»

Подкомитет А1 РНК СИГРЭ «Вращающиеся электрические машины» создан решением Технического комитета РНК СИГРЭ от 15.11.2017 № 09.02-9 (14) на базе ПАО «Интер РАО».

Подкомитет А1 РНК СИГРЭ действует на основании Типового положения о подкомитете, форма которого утверждена решением Президиума РНК СИГРЭ от 25.04.2014 № 3/8.

В соответствии с решением Технического комитета РНК СИГРЭ от 05.06.2018 № 09.02-11 (16) было принято решение о создании национальных проблемных рабочих групп по тематическому направлению Подкомитета А1.

Проблемная рабочая группа (ПРГ) А1.1 «Области применения асинхронизированных машин в отечественной и зарубежной электроэнергетике» была утверждена решением Технического комитета РНК СИГРЭ (Протокол заседания Технического комитета от 05.06.2018) № 09.02-11 (16).

ПРГ А1.2 «Системы технического обслуживания и ремонта генераторов (концепция, тенденции, перспективы)» была утверждена решением Технического комитета РНК СИГРЭ (Протокол заседания Технического комитета от 05.06.2018) № 09.02-11 (16).

ПРГ А1.3 «Области применения вентильных индукторных машин со вставками постоянного тока в электроэнергетике» была утверждена решением Технического комитета РНК СИГРЭ (Протокол заседания Технического комитета от 05.06.2018) № 09.02-11 (16).

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СК, СТАТКОМА И СТАТИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Тип компенсатора	СК	СТАТКОМ	Статический компенсатор напряжения
Функционал			
Инерция вращения (стабилизация частоты сети)	Да (инерция может увеличиваться за счет использования маховика на валу компенсатора)	Нет (да, если СТАТКОМ снабжен АБ со специальной улучшенной системой регулирования)	Нет
Динамическое регулирование реактивной мощности	Да	Да	Да
Мощность короткого замыкания	Очень высокая	Очень ограниченная в связи с использованием в системе компенсации электронных компонентов	Очень ограниченная в связи с использованием в системе компенсации электронных компонентов
Технические характеристики			
Время отклика для стабилизации частоты сети	Мгновенное	Не может регулировать частоту (может, если снабжен АБ)	Не может регулировать частоту
Время отклика регулирования напряжения	Быстрое	Быстрое	Среднее
Перегрузочная способность	Да (200% в течение 12,5 с)	Нет	Нет
Отношение потерь при номинальной нагрузке к номинальной мощности, %	~1,5	~1	~1
Коэффициент готовности	Средний (~99% из-за наличия вращающихся частей)	Высокий (только статическая часть)	Высокий (только статическая часть)
Стоимость			
CAPEX (для поддержания частоты сети)	Низкие	Невозможно регулирование частоты (или очень высокая стоимость при добавлении АБ)	Невозможно регулирование частоты
CAPEX (для регулирования напряжения)	Средние	Средние	Низкие
ОРЕХ	Низкие	Низкие (или высокая при добавлении АБ)	Низкие
Другие характеристики			
Габаритные размеры	Компактные	Средние	Большие
Готовность технологии	Подтверждена	Подтверждена, но имеется риск, связанный с быстрым развитием технологии	Подтверждена
Установка	Наружная	Частично наружная, частично внутренняя	Частично наружная, частично внутренняя
Срок службы, годы	40	30	40

Таблица 1

СТАТКОМ С АБ МОЩНОСТЬЮ 30 МВАР (А) И СК С МАХОВИКОМ МОЩНОСТЬЮ 250 МВАР (Б)

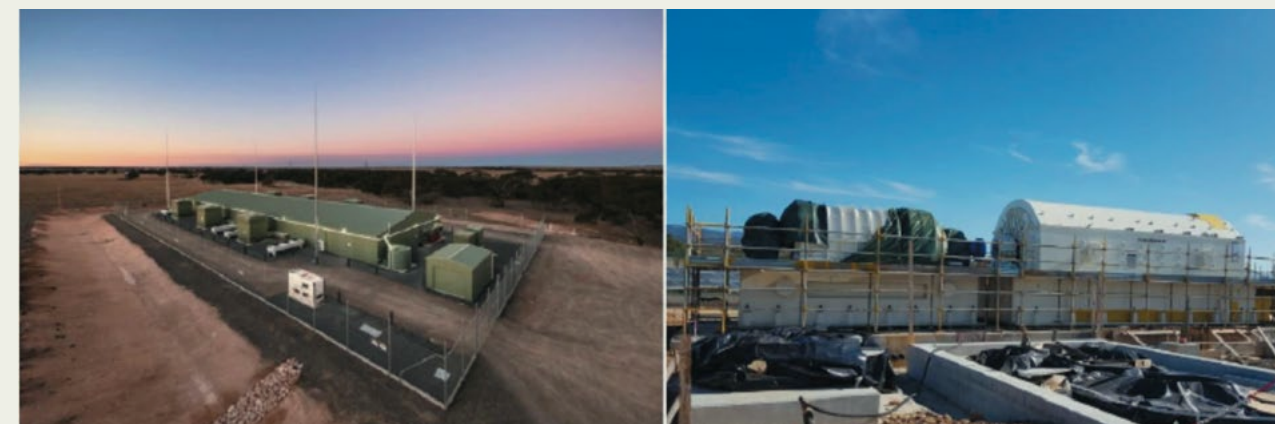


Рис. 1

а)

б)

- статические компенсаторы и шунтовые реакторы;
- SVCs (статические компенсаторы напряжения);
- STATCOMs (статические СК).

В последние несколько лет все большее распространение получают комбинированные устройства, например СТАТКОМ и BESS, позволяющие оптимизировать режимы регулирования напряжения и частоты.

Сравнительный анализ возможностей обычных СК, СТАТКОМа и статических компенсаторов напряжения приведен в табл. 1.

На основании анализа основных характеристик систем компенсации в табл. 1 авторы описывают преимущества применения СК в электрических сетях с высокой долей возобновляемых источников энергии (Швейцария, Франция) и обосновывают широкое использование в электрических сетях будущего устройств компенсации реактивной мощности с функцией накопления активной энергии: СТАТКОМ с сис-

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СК С МАХОВИКОМ И СТАТКОМА С АБ

Параметр	СК с маховиком	СТАТКОМ с АБ
Номинальная мощность, МВАр	250	30
Номинальное напряжение в точке подключения к электрической сети, кВ	400	33
Запасенная энергия, МВт·ч	0,49 (кинетическая)	8 (электрохимическая)
Цена, млн евро	23,5 (включая контракт на 10 лет обслуживания ~3 млн евро)	19 (включая контракт на 12 лет обслуживания)
Диапазон регулирования мощности в установившемся режиме, МВАр	-150/+250	-30/+30
Мощность короткого замыкания, МВА	1200	60
Регулирование частоты	Нет	Быстрое
Площадь, м ²	~4500	~3000
Потери, % от номинальной мощности	~1	~1

Таблица 2

КОНСТРУКЦИЯ МАХОВИКА, СОЧЛЕНЕННОГО С ВАЛОМ СК

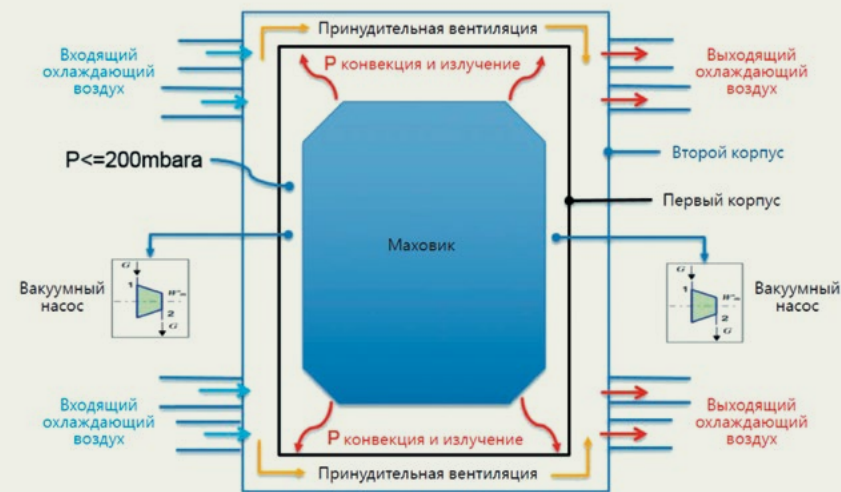


Рис. 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВОГО СК МОЩНОСТЬЮ 300 МВАР

Индуктивное сопротивление по продольной оси, %	x_d	150,5 ~ 153
Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси, %	x'_d	14 ~ 16,5
Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси, %	x''_d	11,1 ~ 11,3
Переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутых обмотках, с	T'_{d0}	7,46 ~ 8,8
Переходная постоянная времени по продольной оси, с	T'_d	0,71 ~ 0,72
Кратность форсировки	K_m	3,5
Перегрузочная способность ротора	–	$2,5 I_n$ в течение 15 с
Перегрузочная способность статора	–	$3,5 I_n$ в течение 15 с
Потери, %	–	1,07 ~ 1,15

Таблица 3

темой накопления энергии (АБ) и СК с маховиком (рис. 1).

Такие устройства уже применяются на практике. В табл. 2 представлены основные характеристики СК с маховиком, который в настоящее время монтируется на о. Сардиния (Италия), и СТАТКОМа с АБ, установленного в энергосистеме Австралии.

Авторы доклада, анализируя характеристики данных устройств, делают следующие выводы:

- оба устройства выполняют возлагаемые на них функции;
- СК с маховиком имеет лучшие массогабаритные и стоимостные показатели по сравнению со СТАТКОМом с АБ;
- применение СК с маховиком в электрических сетях будущего является оправданным с технической и экономической точек зрения.

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СК С МАХОВИКОМ

Электрические сети с преобладанием солнечной и ветровой генерации, о которых говорилось ранее, уже созданы в некоторых странах. Так, итальянская компания Terna является оператором подобной электрической сети на юге Италии.

В докладе А1–304 «Технические проблемы и решения для новых стандартизированных синхронных компенсаторов с маховиком на валу энергетической компании Terna» (L. Buono, G. Gemelli, F. Palone, F.M. Pepe, A. Valant, A. Oldrati, M. Raciti, M. Schenone, G. Roveta, A. Stiger, L. Callegari, L. Negri, M. Rebolini, Италия, Швеция)

рассказывается о работе компании в целях развития и обеспечения надежности функционирования этой сети.

В 2018 г. компанией Terna были разработаны технические требования для СК с маховиком, которые будут использоваться на ее подстанциях (ПС) напряжением 400 кВ.

СК должны иметь:

- синхронную частоту вращения 3000 об/мин;
- замкнутую систему охлаждения;
- наружную установку.

Они должны обеспечивать:

- диапазон регулирования реактивной мощности +250/–125 МВАр при номинальном напряжении 19 кВ;
- длительную перегрузку до 290 МВАр при минимальной температуре окружающей среды;
- кратковременную перегрузку до 375 МВАр в течение 30 с и 500 МВАр в течение 10 с.

Конкурс на поставку первых восьми компенсаторов, изготовленных в соответствии с этими требованиями, был проведен в 2018 г. Четыре компенсатора, изготовленные консорциумом Ansaldo Energia и ABB, планировалось ввести в эксплуатацию до конца 2021 г.

Конкурс на поставку еще восьми компенсаторов был начат в 2019 г. и в настоящее время пока не завершен.

В докладе описано интересное решение по конструкции маховика, который размещен в вакуумной камере на двух внешних опорах с подшипниками (рис. 2). Таким образом обес-

печивается компактность устройства. Также приняты меры по снижению потерь на трение и обеспечению эффективного охлаждения устройства.

Больших успехов по внедрению СК с маховиком достигла Китайская Народная Республика. Необходимость их внедрения в электрические сети Китая связана не только с повсеместным применением источников генерации, использующих энергию ветра и солнца, но и с передачей энергии с запада на восток Китая по линиям электропередачи постоянного тока напряжением 1000 кВ. СК устанавливаются на ПС, где осуществляется стыковка сетей переменного и постоянного токов.

В докладе А1–310 «Разработка и применение новых быстродействующих мощных синхронных компенсаторов в электрической сети ультравысокого напряжения» (Y. Jin, J. Zhang, F. He, J. He, Китай) представлены основные достижения в части создания и внедрения в эксплуатацию нового поколения СК для электрической сети ультравысокого напряжения. Работы в этом направлении начались в 2015 г.

В настоящее время первая партия из 17 компенсаторов для восьми ПС уже введена в эксплуатацию. Еще 10 находятся в стадии изготовления и поставки. Компенсаторы имеют мощность 300 МВАр, горизонтальное неявнополюсное исполнение и статическую систему возбуждения (табл. 3). В докладе приведены результаты моделирования электрической сети с установленными компенсаторами, показано, что их установка существенно повышает надежность ее функционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СК с маховиком, по всей видимости, станут неотъемлемым элемен-

том электрических сетей с высокой долей генерации, основанной на использовании энергии ветра и солнца. СК с маховиком имеют лучшие массогабаритные и технико-экономические показатели по сравнению с аналогичными статическими устройствами.

Следует отметить, что одной из первых публикаций по вопросу использования СК в энергосистемах был доклад советских ученых И.А. Глебова и Н.И. Соколова, озвученный на сессии СИГРЭ в 1972 г.

В СССР и России проводились работы как по расширению функциональных возможностей классических компенсаторов, так и по созданию и применению асинхронизированных синхронных компенсаторов, успешно работающих на ПС.

В 2011–2012 гг. «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» совместно с АО «Силовые машины» были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию на ПС 500/220/110/10 (20) кВ «Бескудниково» два компенсатора типа АСК-100–4 [3]. Сопоставительный анализ отечественных АСК с синхронными компенсаторами с маховиками будет выполнен позднее.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.cigre.org/article/GB/virtual-centennial-session> (дата обращения: 15.12.2020).
2. http://www.cigre.ru/activity/session/session_2020/ (дата обращения: 15.12.2020).
3. Володарский Л.Г., Довганюк И.Я., Мнев Р.Д., Плотникова Т.В., Сокур П.В., Тузов П.Ю. Результаты испытаний асинхронизированных компенсаторов типа АСК-100–4УХЛ4 на ПС 500 кВ «Бескудниково» // Электрические станции. 2013. № 7. С. 43–52.