

28. Misrikhanov M.Sh., Sitnikov V.F., Sharov Yu.V. *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2007, No. 10, pp. 22–29.
29. Mitsubishi Electric Power System Stabilizer (PSS): <http://www.meppi.com/Products>
30. Kundur P., Klein M., Rogers G.J., Zywno M.S. Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability. – IEEE Trans. Power Systems, 1989, vol. 4, pp. 614–626.
31. Lin C.-M., Vittal V., Kliemann W., Fouad A.A. Investigation of modal interaction and its effects on control performance in stressed power systems using normal forms of vector fields. – IEEE Trans. Power Systems, 1996, vol. 11, pp. 781–787.
32. Jang G., Vittal V., Kliemann W. Effect of nonlinear modal interaction on control performance: use of normal form techniques in control design. – IEEE Trans. Power Systems, 1998, vol. 13, No. 2, pp. 401–407.
33. Lomei H., Sutanto D., Muttaqi K.M., Assili M. A new approach to reduce the non-linear characteristics of a stressed power system by using the normal form technique in the control design of the excitation system. – Industry Appl. Society Annual Meeting, 2015 IEEE, 2015, pp. 1–6.
34. Barocio E., Messina A.R. Normal form analysis of stressed power systems: incorporation of SVC models. – J. Electrical Power and Energy Systems, 2003, No. 25, pp. 79–90.
35. Barocio E., Messina A.R. Analysis of nonlinear modal interaction in stressed power system with SVCs. – IEEE PES Winter Meeting, 2002, vol. 2, pp. 1164–1169.
36. Davarani R.Z., Ghazi R., Pariz N. Nonlinear Analysis of Interaction with SVC in Stressed Power Systems: Effect of SVC Controller Parameters. – Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, 2013, vol. 9, No. 2, pp. 107–116.
37. Zou Z.Y., Jiang Q.Y., Cao Y.J., Wang H.F. Normal form analysis of interactions among multiple SVC controllers in power systems. – IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, 2005, vol. 152, No. 4, pp. 469–474.
38. Acha E., Fuerte-Esquivel C.R., Ambriz-Pérez H., Angeles-Camacho C. FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks. – John Wiley & Sons, 2004, 420 p.
39. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – IEEE Press, 2000, 432 p.
40. Zou Z.Y., Jiang Q.Y., Cao Y.J., Wang H.F. Investigation of Interactions among the Multi-control Channels of UPFC using Normal Forms of Vector Fields. – The 39th Inter. Univ. Power Engineering Conf., 2004, vol. 1, pp. 343 – 347.
41. Zhou E. Z., Malik O.P., Hope G.S. Theory and method for Selection of Power System Stabilizer Location. – IEEE Trans. Power Systems, 1991, vol. 6, pp. 170–176.
42. Zhou E.Z., Malik O.P., Hope G.S. Design of stabilizer for a multimachine power system based on the sensitivity of PSS effect. – IEEE Trans. on Energy Conversion, 1992, vol. 7, No. 3, pp. 606–613.

* * *

Электричество, 2016, № 12, с. 20–27.

Повышение динамической устойчивости электростанции с помощью накопителей энергии

ЕФРЕМОВ Д.Г., ГЛУСКИН И.З.

Рассмотрена возможность применения накопителей энергии различных видов для сохранения динамической устойчивости параллельной работы генераторов станций. Рассмотрены накопители: сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии, молекулярный конденсатор, маховиковый накопитель, аккумуляторная батарея большой мощности. Проведен выбор параметров каждого из видов накопителей. Разработана экспериментальная модель, позволяющая моделировать короткое замыкание в энергосистеме с накопителями. На основе проведенных экспериментов оценены действия отдельных рассматриваемых накопителей, определена возможность их применения, недостатки и преимущества использования для повышения динамической устойчивости параллельной работы генераторов электростанций.

Ключевые слова: накопители энергии, противоаварийная автоматика, динамическая устойчивость, моделирование

Развитие энергетики в условиях рыночных отношений неизбежно приводит, с одной стороны, к укрупнению генерирующих узлов и единичной мощности генераторов из-за повышения экономической эффективности оборудования с большей номинальной мощностью, которые не всегда маневренны, а с другой стороны, всё больше используется маломаневренная распределенная генерация. В связи с этим возникает вопрос, напрямую связанный с увеличением доли маломаневренных ТЭС, ГЭС и ПГУ – сохранение динамической устойчивости генерирующего оборудования при коротких замыканиях (КЗ).

В статье проводится оценка возможности применения накопителей электроэнергии как средства

повышения динамической устойчивости генераторов при нормативных КЗ.

В настоящее время задача сохранения динамической устойчивости возлагается на автоматику предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ). При КЗ АПНУ выбирает и реализует различные управляющие воздействия для предотвращения нарушения динамической устойчивости в энергосистеме. Традиционными управляющими воздействиями АПНУ являются разгрузка тепловых турбин (РТ) и отключение генераторов (ОГ).

К недостаткам РТ относятся: сложность расчета импульса; возможность потери устойчивости на втором цикле качаний; возможность переторможения генератора; усложнение конструкции турбины

и, следовательно, ее удорожание; ограниченная скорость изменения мощности при РТ.

Имеет ряд недостатков и ОГ: увеличивая сопротивление генераторов отправной части, увеличивается взаимное сопротивление в послеаварийном режиме, уменьшая тем самым предел передаваемой мощности по сечению. Кроме того, ОГ ведет к уменьшению выдаваемой реактивной мощности, что также снижает предел электропередачи. К тому же, частые отключения вредны для оборудования.

Для оптимизации противоаварийного управления в настоящее время целесообразно использовать управляемые силовые элементы сети (устройства FACTS), в том числе накопители энергии: сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИНЭ), аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ), молекулярные конденсаторы (МК), маховиковые накопители энергии (маховик). С помощью этих устройств появляется возможность предотвращения нарушения устойчивости в энергосистеме без нарушения электроснабжения потребителей и без снижения пропускной способности сети [1, 2]. Кроме того, накопители могут быть полезны не только для сохранения динамической устойчивости. Устройства типа FACTS также могут быть использованы для решения других задач (например, демпфирование нерегулярных колебаний, использование для повышения статической устойчивости и пр.). К настоящему времени был выполнен большой объем исследований в области использования накопителей энергии (в основном в области электротранспорта), но вопрос использования накопителей различного вида в целях противоаварийной автоматики (ПА) остается открытым.

В статье приведены результаты исследования возможности применения накопителей электро-

энергии для поддержания динамической устойчивости при КЗ нормативной длительности.

Описание исследуемой модели. Моделирование рассматриваемых накопителей, а также элементов сети (генератор, высоковольтная линия, трансформатор, система) проводилось в программном комплексе (ПК) Matlab (в среде Simulink). Данный ПК обладает широкими возможностями моделирования электроэнергетических систем и содержит в себе большой набор готовых элементов [3].

Моделирование процессов в электроэнергетических сетях в среде Simulink осуществляется следующим образом: из отдельных блоков, каждый из которых представляет отдельный элемент системы, собирается моделируемая схема. Каждый из блоков содержит систему дифференциальных уравнений (или структурную схему), описывающих состояние каждого из элементов сети. Моделирование осуществляется последовательным итеративным вычислением в каждом из блоков модели, с параллельным выводом результатов.

Для исследования возможности применения накопителей для повышения динамической устойчивости параллельной работы генераторов в среде Simulink была создана модель энергосистемы (рис. 1,а), включающая следующие элементы: синхронный генератор 170 МВт (200 МВА), трансформатор, линия, модель нагрузки, модель для имитации КЗ, модель накопителя, модель преобразователя с системой управления.

Модель генератора описывается типовой системой уравнений Горева–Парка для синхронного генератора с демпферными обмотками при неучете переходных процессов в обмотке статора (такое допущение объясняется тем, что основное внимание уделяется именно электромеханическим переходным процессам), которые приведены в [4].

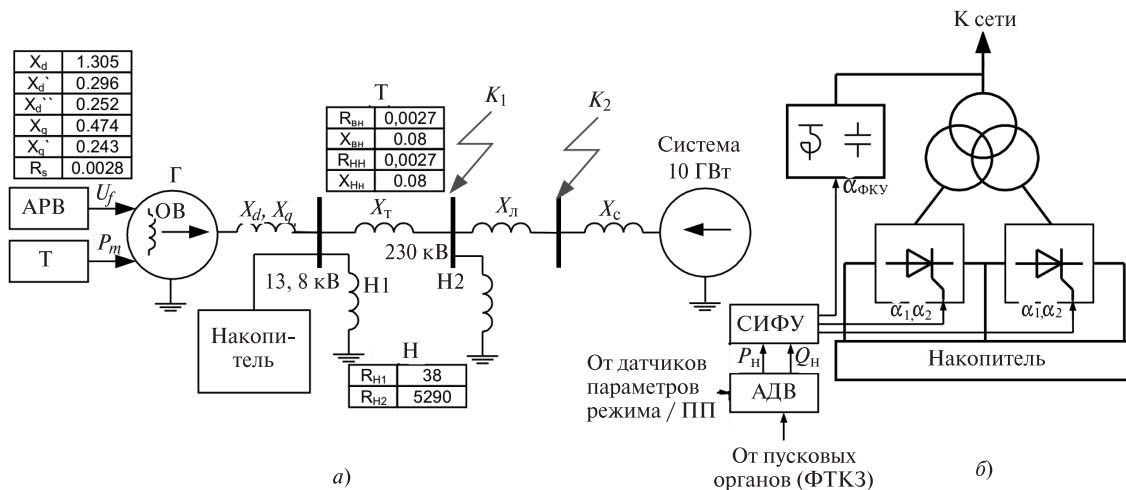


Рис. 1. Схема замещения исследуемой энергосистемы (а) и схема подключения накопителя к сети (б): ФКУ – фазокомпенсирующее устройство; СИФУ – система фазо-импульсного управления; АДВ – автоматика дозировки воздействий

Модели нагрузки, трансформаторов, линий представляются соответствующими сопротивлениями, не изменяемыми в ходе процесса моделирования. Модель системы представляет собой модель шин бесконечной мощности.

Для связи накопителя с сетью, а также для реализации режимов заряда/разряда накопитель подключается через тиристорный преобразователь с сетевыми трансформаторами (рис. 1,б). Для раздельного управления активной и реактивной мощностью выбран мостовой тиристорный преобразователь на базе управляемых вентилях (IGBT) с буферными вентилями.

В связи с высокой скоростью протекания исследуемых переходных процессов действие регуляторов (а именно автоматики регулирования частоты вращения и автоматики регулирования возбуждения) не учитывается, так как указанные регуляторы не могут оказать значительного влияния на переходный процесс.

В рамках исследуемой модели рассматриваются следующие возмущения, приводящие к возникновению аварийного небаланса мощности:

трехфазное КЗ на выводах высшего напряжения блочного трансформатора;

двухфазное КЗ на землю на отходящей линии 230 кВ;

отключение линии, связывающей генератор с системой, в результате однофазного КЗ, отключаемого быстродействующей защитой с последующим успешным автоматическим повторным включением.

Описание моделей накопителей. *Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии.* Математическая модель исследуемого СПИНЭ определяется следующим выражением:

$$I_{\text{спин}} = I_0 + \int (U / L) dt, \quad (1)$$

где $I_{\text{спин}}$ — ток СПИНЭ; I_0 — начальный ток; U — напряжение на зажимах; L — индуктивность.

Дополнительно учитываются следующие ограничения:

ограничение по максимальной скорости изменения тока:

$$\frac{di}{dt} \leq \left(\frac{di}{dt} \right)_{\max} = \frac{S}{L} \left(\frac{\Delta B}{\Delta t} \right)_{\max}; \quad (2)$$

на текущей стадии развития СПИНЭ данное ограничение является решающим и составляет порядка 15 кА/с [5];

ограничение по максимальному току СПИНЭ (из условия сохранения сверхпроводящего состояния проводников): $I \leq I_{\max}$;

Индуктивность накопителя определяется из выражения

$$L = \frac{2E}{I_{\max}^2}. \quad (3)$$

Существующие разработки в области СПИНЭ позволяют достигать значений энергоемкости порядка 100 МДж, однако в настоящее время ведется работа по разработке накопителей значительно большей мощности [6]. Плотность энергии для СПИНЭ составляет 1000–3000 Дж/кг [6].

Молекулярный конденсатор. В модели используется базовая модель молекулярного конденсатора из пакета SimulinkPowerSys [7].

Максимальная скорость нарастания тока определяется внутренним сопротивлением конденсатора ($6,9 \cdot 10^{-3}$ Ом для молекулярных конденсаторов 100÷150 Ф):

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I}{RC} = \frac{U}{R^2 C}. \quad (4)$$

Существующие разработки в области молекулярных конденсаторов позволяют достигать практически любой энергоемкости благодаря соединению молекулярных конденсаторов в батареи и небольшим габаритам самого молекулярного конденсатора. Например, в России выпускаются конденсаторы ИКЭ-160/800 [8], запасующие энергию 160 кДж (800 В), массой 36 кг.

Аккумуляторные батареи большой мощности. В настоящее время применяемые для целей сохранения электроэнергии АББМ выполняются на базе литий-ионных аккумуляторных ячеек (Li-Ion) [9]. Параметры ячейки SPB803496H:

Емкость (0,2С)	2600 мАч
Напряжение	
минимальное	2,8 В
номинальное	3,7 В
максимальное	4,2 В
Ток разряда	
номинальный	1,30/0,5 мА/с
максимальный	41,60/16,0 мА/с
Ток заряда	
номинальный	1,30/0,5 А/с
максимальный	2,60/1,0 А/с
Вес	56 г

В качестве математической модели АББМ используется базовая модель батареи из пакета SimulinkPowerSys [7].

Максимальная скорость нарастания тока с учетом временем отклика батареи (response time) для выбранной ячейки в режиме разряда составляет:

$$(\Delta I / \Delta t)_{\text{яч}} = 0,2 \text{ А/с}. \quad (5)$$

Таким образом, максимальная скорость нарастания тока для батареи, составленной из n ячеек, определяется следующим образом:

$$(\Delta I / \Delta t) = n(\Delta I / \Delta t)_{\text{яч}}. \quad (6)$$

Маховиковый накопитель. Конструкция маховикового накопителя подразумевает наличие маховика и установленной на одном валу с ним обратной машины.

В качестве обратимой машины выбрана бесщеточная машина постоянного тока на постоянных магнитах, которая обеспечивает высокую скорость вращения маховика и, как следствие, значительный запас энергии при относительно небольших размерах маховика. Недостатки, присущие данной схеме (сложность регулировки частоты вращения питающего напряжения), не столь критичны, так как вентильный преобразователь в полной мере обеспечивает регулирование данного напряжения в требуемых пределах.

Существующие машины постоянного тока позволяют обеспечивать высокую скорость изменения тока якоря до $100I_{\text{НОМ}}/с$, высокую кратковременную перегрузочную способность [10]. Таким образом, применение бесщеточной машины постоянного тока в качестве генератора/двигателя для маховикового накопителя оправдано.

Наиболее оптимальным материалом для маховиков принято считать углепластиковое волокно, так как оно имеет высокую кинетическую энергоёмкость (185 кДж/кг) и невысокую стоимость [6, 11].

Выбранная форма – сплошной цилиндр. Скорость вращения маховиковых накопителей составляет от 6000 до 40000 об/мин. Учитывая относительно небольшую требуемую энергоёмкость, выбирается частота вращения 15000 об/мин.

Момент инерции вращающего цилиндра определяется:

$$I = 2W / \omega^2, \quad (7)$$

где W – требуемая энергоёмкость; ω – скорость вращения.

Геометрические размеры маховика определяются из известных выражений на основе полученного момента инерции для вращающегося цилиндра.

Выбор общих параметров накопителя. Для обеспечения динамической устойчивости станции в общем и отдельных генераторов при КЗ основной задачей является максимально быстро погасить (или полностью ликвидировать) небаланс мощности, приводящий к снижению электромагнитного момента сопротивления генератора и к нарушению динамической устойчивости последнего.

Электромагнитные накопители, рассматриваемые в статье, позволяют создать дополнительную нагрузку на валу ротора генератора, предотвращая тем самым потерю динамической устойчивости.

Целесообразно сопоставить параметры накопителей энергии по следующим параметрам: энергоёмкость, МДж; максимальный ток накопителя, кА; максимальная мощность накопителя, МВт; максимальная скорость изменения тока, кА/с, и мощности, МВт/с.

Требуемая энергоёмкость определяется для каждого опыта отдельно. Остальные параметры определены экспериментально на рассматриваемой модели:

максимальный ток накопителя – 20 кА;
максимальная мощность накопителя – 200 МВт;
максимальная скорость изменения тока – 30 кА/с;
то же мощности – 300 МВт/с.

Режим № 1: затяжное трехфазное КЗ на выводах высшего напряжения блочного трансформатора. Данный вид возмущения является наиболее тяжелым и характеризуется значительным снижением напряжения в точке КЗ и, следовательно, низким значением остаточного напряжения на шинах генератора.

Для определения энергоёмкости накопителей рассмотрен наиболее тяжелый случай, когда остаточное напряжение на шинах генератора снижается до нуля и, соответственно, вся доаварийная мощность будет способствовать разгону генератора. Таким образом, для генератора 200 МВА ($\cos\varphi=0,85$) и для времени существования КЗ $t_{\text{КЗ}} = 0,18$ с кинетическая энергия разгона генератора будет равна:

$$E_{\text{кин}} = S_{\text{д/ав}} \cos\varphi t_{\text{КЗ}} = 170 \cdot 0,18 = 27,2 \text{ МДж}. \quad (8)$$

С учетом рекомендации для всех накопителей работать при 50%-м заряде (для возможности перевода как в режим заряда, так и в режим разряда) требуемая энергоёмкость составляет 55 МДж.

Фактический объем энергии, разгоняющей генератор, будет несколько меньше из-за удаленности КЗ (за повышающим трансформатором). Экспериментальное значение остаточного напряжения на шинах генератора и на обмотке высшего напряжения трансформатора связи накопителя с сетью составляет 36% номинального (5 кВ).

Можно отметить, что в связи с низким остаточным напряжением на зажимах генератора (а значит и на выводах обмотки высшего напряжения сетевых трансформаторов, связывающих сеть с накопителем) возможности накопителей по потреблению излишней мощности ограничены, так как потребляемая мощность прямо пропорциональна напряжению на выводах обмотки высшего напряжения сетевых трансформаторов.

Выбранные параметры накопителей приведены в табл. 1.

Режим № 2: затяжное двухфазное КЗ на земле на отходящей линии 230 кВ. Режим фактически ана-

логичен предыдущему, однако характеризуется большим остаточным напряжением на зажимах статора (порядка 8 кВ).

Требования к параметрам накопителей аналогичны требованиям режима № 1 и приведены в табл. 1.

Режим № 3: отключение линии, связывающей генератор с системой, в результате однофазного КЗ, отключаемого быстродействующей защитой с последующим успешным автоматическим повторным включением. В данном режиме моделируется двухфазное КЗ на землю, которое штатно устраняется через 80 мс после начала средствами релейной защиты. В результате отключается линия, которая вводится в работу через 100 мс автоматикой. В данном режиме значительно сокращается время КЗ (относительно предыдущих режимов) и, следовательно, время разгона генератора. Отключение линии восстанавливает напряжение на шинах генера-

тора, однако прерывает транзит мощности. Таким образом, моделируется действие накопителей в условиях высокого остаточного напряжения на шинах генератора.

Суммарное время возмущения составляет $t_B = 0,18$ с, что аналогично значениям предыдущих режимов. Соответственно, требования к параметрам накопителей и сами параметры аналогичны требованиям для режима № 1 и приведены в табл. 1 (энергоемкость для всех видов накопителей 55 МДж).

Как видно из приведенной табл. 1, динамические характеристики АББМ и СПИНЭ не удовлетворяют заявленным требованиям. Однако повысить динамические характеристики возможно, увеличив энергоемкость.

В случае СПИНЭ необходимо дополнительно ставить параллельную катушку таким образом, что максимальная скорость нарастания тока достигнет

Таблица 1

Накопитель	Основной параметр	Максимальная скорость изменения тока, кА/с	Удельная плотность энергии, кДж/кг	Расчетный вес, т
СПИНЭ	$L=0,1$ Гн	15*	—	18,0
МК	$C=110$ Ф	236	6,5	8,5
Маховик**	$J=1000$ кг·м ³	до 457	18,0	3,0
АББМ***	$W=2,615$ А·ч	0,3	603,6	0,091

* Обусловлена максимальной скоростью изменения магнитного поля и определяет стабильность сверхпроводниковой обмотки.

** Скорость вращения $W=20000$ об/мин, радиус $r=0,48$ м, длина $l=5,2$, материал – углепластик (для двигателя П2-630-241-8С).

*** Число ячеек $n=15 \times 100$.

Таблица 2

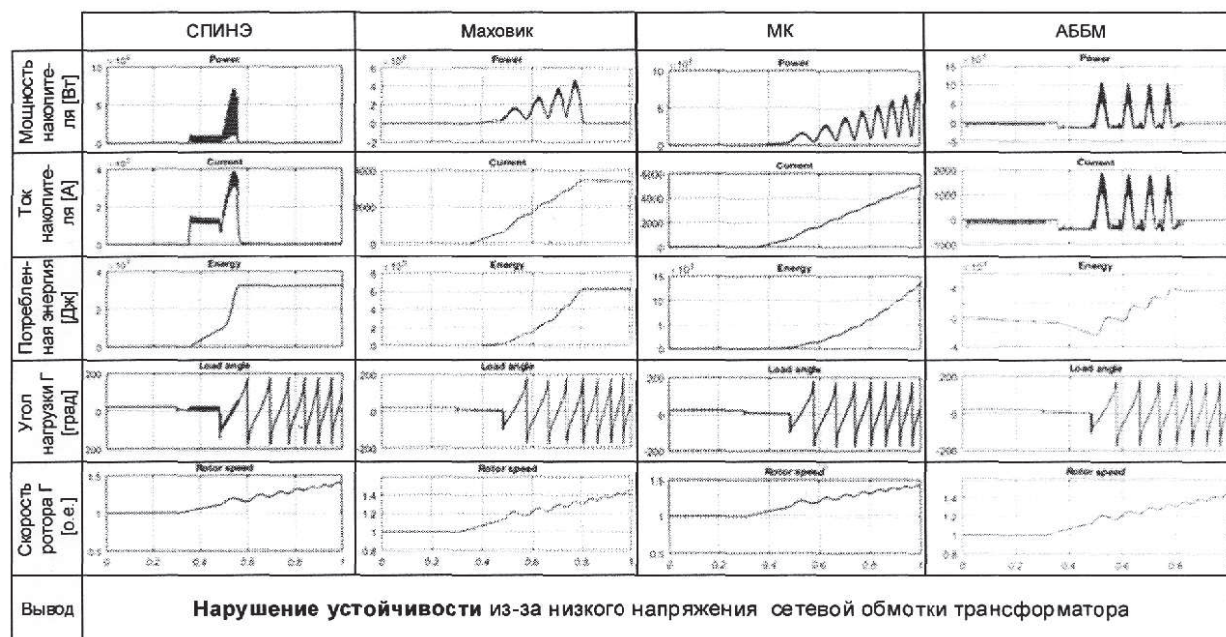


Таблица 3

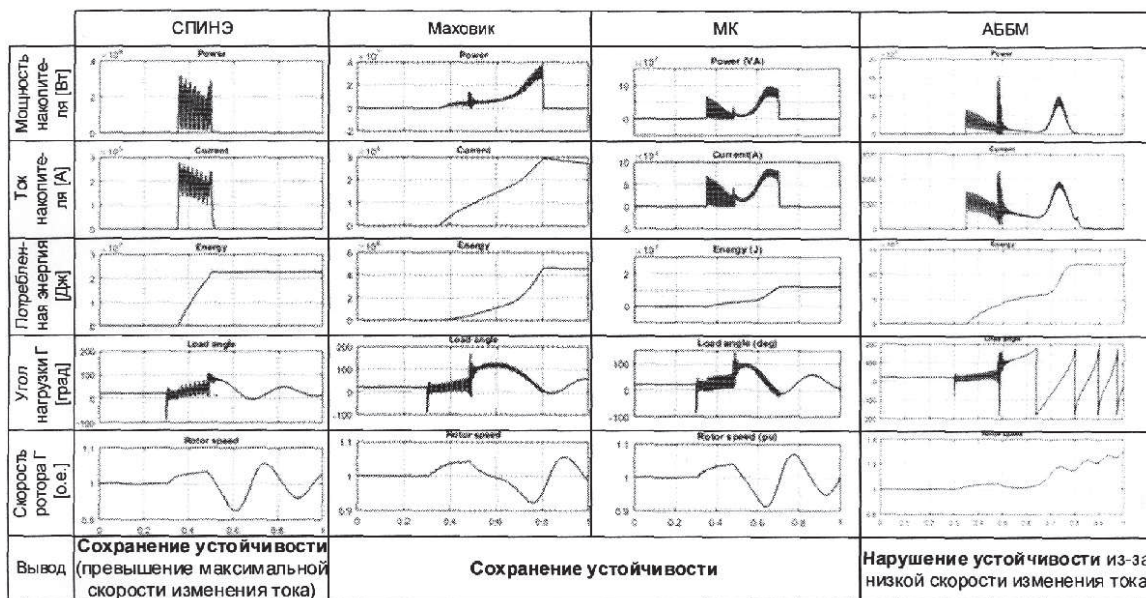
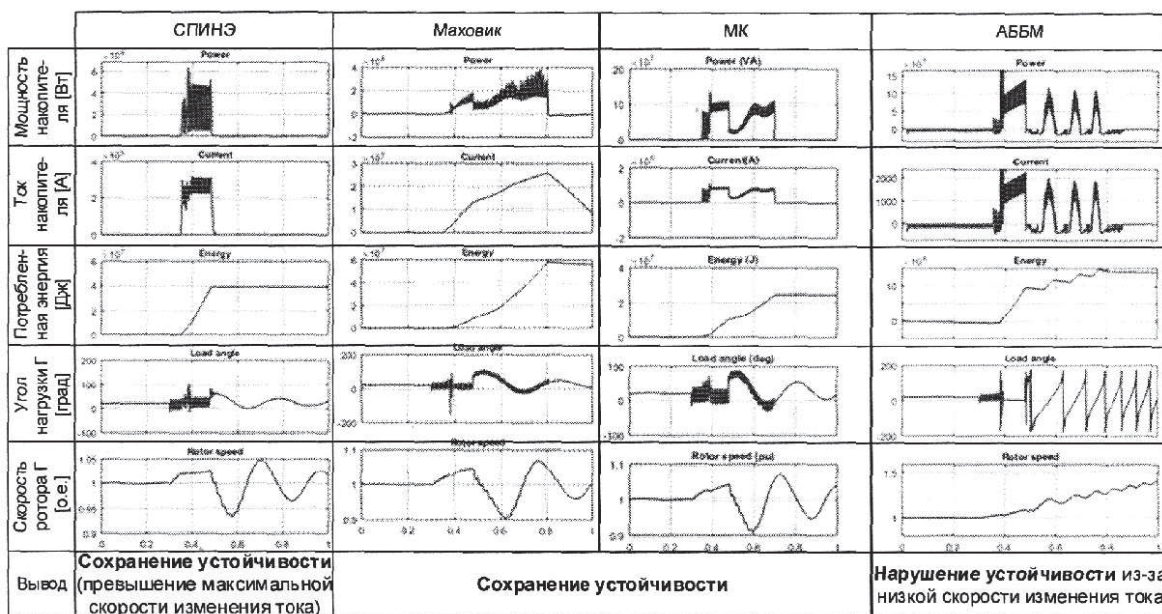


Таблица 4



30 кА/с. В случае АББМ обеспечение требуемых динамических характеристик возможно увеличением числа ячеек. С учетом требования максимальной скорости нарастания тока число требуемых ячеек увеличивается до 150 тысяч элементов. Энергоемкость такой батареи достигнет 5,5 ГДж. Эксперименты, проведенные на разработанной модели, подтверждают возможность применения СПИНЭ и АББМ для динамической устойчивости в случае увеличения энергоемкости до рассчитанных значений.

Результаты опытов для режимов № 1–3 приведены в табл. 2–4 соответственно.

Выводы. Применение накопителей для поддержания динамической устойчивости параллельной

работы генераторов возможно не для всех расчетных случаев. Основная проблема при работе накопителей в режимах КЗ – снижение напряжения на шинах сетевой обмотки трансформатора связи и, соответственно, существенное снижение потребляемой мощности.

Существенное снижение напряжения в месте подключения накопителя (по результатам режима № 1) не позволяет скомпенсировать энергию разгона генератора и препятствовать возникновению асинхронного режима. Тем не менее, учитывая, что аварийные возмущения, сопровождающиеся существенным снижением напряжения на шинах генератора (т.е. в месте подключения накопителя), достаточно редки, а в случае возникновения

— достаточно быстро устраняются, накопители совместно с существующей автоматикой блока могут применяться для более мягкого останова блока.

В связи с более высоким (относительно *режима № 1*) значением остаточного напряжения (по результатам *режимов № 2 и 3*) в месте подключения накопителя СПИНЭ, МК, маховиковый накопитель позволяют скомпенсировать разгон генератора и предотвратить возникновение асинхронного режима.

Характеризующиеся низкой ценой и высокой энергоемкостью АББМ из-за низких динамических характеристик не позволяют обеспечить требуемую скорость нарастания тока при КЗ при расчете энергоемкости из условия объема необходимой потребленной энергии. Другими словами, при расчете энергоемкости АББМ для целей динамической устойчивости необходимо учитывать условие по требуемой скорости нарастания тока (экономическая целесообразность данного подхода в статье не рассматривалась). Тем не менее, АББМ может использоваться как устройство заряда/разряда других накопителей с более высокими динамическими характеристиками для снижения их требуемой энергоемкости и, соответственно, цены.

Как следует из анализа временных зависимостей, несмотря на эффективное действие СПИНЭ, ограничение по максимальной скорости изменения тока не позволяет в полной мере использовать данный тип накопителя. Данная проблема решается параллельным подключением дополнительной катушки. Однако в связи с бурным развитием технологий сверхпроводимостей (в частности высокотемпературной сверхпроводимости) данное ограничение может быть снято.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 12, pp. 20–27.

Transient Stability Increasing with the Help of Energy Storage Systems

EFREMOV Dmitriy Gennad'evich (*Ltd «ORZAUM», Moscow, Russia*) — *Leading Engineer, Graduate Student of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»)*

GLOUSKIN Igor' Zakharovich (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

The paper investigates the possibility of application of various types of energy storage systems with the aim of transient stability of power station parallel operation preservation. The following types of energy storage systems were considered: superconducting magnetic energy storage, molecular capacitor, flywheel storage, battery of high capacity. Parameters of each type of storage systems were selected. Experimental model that could be used for short circuit in power system with energy storage systems simulation was developed. The results of the experiments was carried out helped to estimate operation of each type of considered energy storage systems, the possibility of their application was defined, advantages and disadvantages for parallel power station operation transient stability preservation have been identified.

Key words: *energy storage, emergency control system, transient stability, simulation*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глускин И.З., Иофьев Б.И.** Противоаварийная автоматика в энергосистемах, т. I. — М.: Знак, 2009, 568 с.
2. **Глускин И.З., Иофьев Б.И.** Противоаварийная автоматика в энергосистемах, т. II. — М.: Знак, 2011, 528 с.
3. **Черных И.В.** SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink: [www.matlab.exponenta.ni/simpower /bookl/index.php](http://www.matlab.exponenta.ni/simpower/bookl/index.php)
4. **Важнов А.И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. — Л.: Энергия, 1980, 256 с.
5. **Глускин И.З., Наровлянский В.Г.** Сверхпроводниковые токоограничивающие устройства и индуктивные накопители энергии для электроэнергетических систем. — М.: Энергоатомиздат, 2011, 373 с.
6. **Ter-Gazarian.** Energy Storage for Power System. 2nd edit. — London (UK): The Institution of Engineering and Technology, 2011, 276 p.
7. <http://www.mathworks.com/help /physmod/sps/index.html>
8. http://econd-spb.ru/#/c_343
9. <http://www.rusbat.com/Interbat20160323/NovikovInterbat160323.pptx>
10. <http://www.zkem.com.ua/dvigateli-reversivnie-ryada-p2-21-25-gabaritov.html>
11. **Гулия Н.В.** Супермаховики — из суперкарбона! — Изобретатель и рационализатор, 2005, № 12(672), с. 14.

[31.08.2016]

А в т о р ы : Ефремов Дмитрий Геннадьевич окончил электроэнергетический факультет Ивановского государственного энергетического университета в 2009 г. Ведущий инженер департамента противоаварийной автоматики ООО «ОРЗАУМ». Аспирант кафедры релейной защиты и автоматизации энергосистем (РЗ и АЭ) Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт (НИУ «МЭИ»).

Глускин Игорь Захарович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1967 г. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка иерархической, эшелонированной системы противоаварийного управления электроэнергетическими объединениями». Профессор кафедры РЗ и АЭ НИУ «МЭИ».