

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29401>



Е.А. Захарян, А.Н. Беляев ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ andrey.belyaev@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

Аннотация. Работа посвящена исследованию возможности применения данных СМПР в управлении электроэнергетических систем для увеличения динамической и колебательной статической устойчивости. Разработана эквивалентная модель транзитной электропередачи Северо-Запад – Центр – Беларусь с соответствующими системными связями. При этом выявлено, что энергообъединение имеет достаточно низкие показатели колебательной статической и динамической устойчивости. Для повышения надежности энергосистемы традиционное управление турбин по частоте дополняется обратными связями по разности фаз векторов напряжений, измеряемых в различных частях транзитной структуры. Показано, что динамическая устойчивость увеличивается более чем в четыре раза, а колебательная статическая устойчивость – в три раза. В ряде случаев управление турбиной дополняется действием аккумуляторных систем накопления энергии, работающих в послеаварийных ситуациях. В этом случае динамическая устойчивость возрастает почти в шесть раз.

Ключевые слова: система мониторинга переходных режимов, статическая устойчивость, автоматический регулятор частоты и мощности, динамическая устойчивость, синхронный генератор, накопитель электрической энергии.

Для цитирования:

Захарян Е.А., Беляев А.Н. Повышение надежности электроэнергетических систем на основе применения накопителей энергии, управляемых по данным мониторинга переходных режимов // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 24–36. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29401>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29401>*E.A. Zakharyan, A.N. Belyaev* ✉Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ andrey.belyaev@gmail.com

IMPROVING RELIABILITY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS BY WAMS DATA CONTROLLED TURBINES AND ENERGY STORAGES

Abstract. The paper is devoted to studying the possibilities of using Wide Area Measurement Systems (WAMS) data in the control of electric power systems to increase transient and small-signal stability. The authors present a developed North-West – Center – Belarus intertie model with corresponding system connections. It is confirmed that intertie has rather low indices of small-signal oscillatory and transient stability. To improve reliability of the power system, traditional frequency control is supplemented by feedbacks of phasor difference and its second derivative measured in different parts of interconnection. Its operation was tested at several large power plants during short circuits at various points of the system. It is shown that transient stability increases by more than four times, and in addition, small-signal oscillatory stability grows by more than three times. In a number of cases turbine control is replaced by action of battery energy storage systems (BESS) operating in post-emergency situations. Various options for its control are considered. It is shown that transient stability of the intertie with exponential controlled BESS increases up to six times.

Keywords: wide area measurement system, steady-state stability, phasor measurement unit, automatic generator control, transient stability, synchronous generator, battery energy storage system.

Citation:

E.A. Zakharyan, A.N. Belyaev, Improving reliability of electric power systems by WAMS data controlled turbines and energy storages, *Global Energy*, 29 (04) (2023) 24–36, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29401>

Введение. Стремительное развитие информационных и телекоммуникационных технологий позволяет внедрять их последние достижения в практику работы электроэнергетических систем (ЭЭС). Необходимость подобной модернизации возникла в связи с участвовавшими крупными системными авариями в различных странах, основными причинами которых являлись как устаревание основного оборудования, так и зачастую неспособность оперативного персонала быстро оценить аварийное состояние системы и информировать смежные энергообъединения.

Появление систем синхронизированных векторных измерений [1], теоретически предложенных еще в 60ые годы прошлого столетия и получивших широкое распространение с появлением высокоскоростных каналов связи и систем единого времени на основе группировок спутников глобального позиционирования, приводит к существенному улучшению как наблюдаемости крупных энергообъединений, так и их управляемости.

Использование данных систем мониторинга переходных режимов (СМНР) при управлении различными частями объединенных энергосистем (ОЭС) позволит значительно снизить тяжесть системных аварий за счет использования не только локальной информации, измеряемой на конкретных электрических станциях и крупных узловых подстанциях, но и глобальных измерений с учетом работы энергообъединения в целом [2, 3]. Сбор таких данных на сегодняшний день не

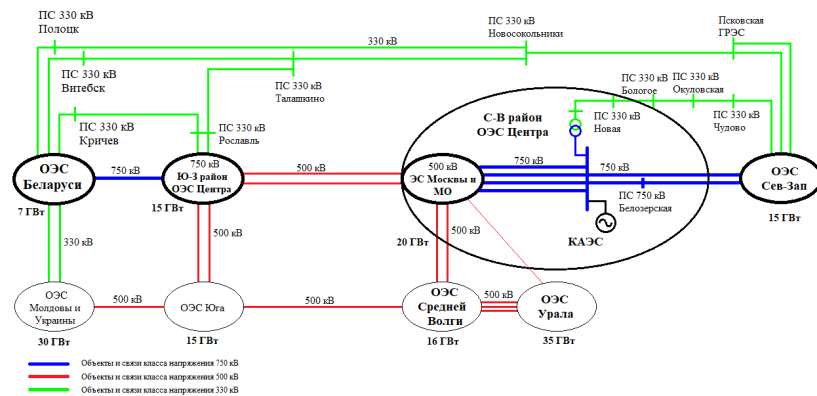


Рис. 1. Обобщенная диаграмма межсистемных связей 330–750 кВ европейской части ЕЭС России
 Fig. 1. Block diagram of 330–750 kV interconnection in European part of Russian UPS

представляет каких-либо трудностей, однако их использование ограничивается верификацией динамических моделей энергосистем, расследованием различных аварийных ситуаций и т.п.

Таким образом, основная цель работы состоит в обосновании повышения уровня статической и особенно динамической устойчивости крупных протяженных энергосистем за счет применения данных СМПР в алгоритмах управления активной мощностью генераторов и/или накопителей электрической энергии на примере межсистемных связей ОЭС Северо-запада, Центра и Беларуси (рис. 1). При этом основными задачами работы являются следующие:

- разработка и совершенствование динамической модели транзитной структуры «Северо-запад – Центр – Беларусь» на языке Modelica;
- обоснование целесообразности внедрения в традиционные локальные системы управления данными измерений из различных частей энергообъединения (так называемых взаимных параметров);
- повышение динамической устойчивости ЭЭС на основе использования систем накопления энергии различного типа (в частности, аккумуляторных);
- координация управляющих воздействий накопителей электрической энергии и систем регулирования частоты генераторов электрических станций.

Внедрение данных СМПР в системы регулирования мощности турбин для повышения устойчивости ЭЭС

Очевидно, что в энергообъединениях транзитной структуры, каковой в данном случае и является межсистемная связь ОЭС Северо-запада, Центра и Беларуси, наиболее тяжелыми будут являться аварийные ситуации в крайних частях ЭЭС (избыточные ОЭС Северо-запада и Беларуси).

Существенная доля нагрузки в рассматриваемом энергообъединении находится в ОЭС Центра (дефицитная область), в то время как крупными узлами генерации являются Ленинградская, Смоленская и Белорусская АЭС.

Эквивалентирование исходной структуры, представленной на рис. 1, позволило разработать модель ЭЭС, включающую в себя 11 синхронных машин, 48 узлов, 44 линии электропередачи и 10 узлов нагрузки (рис. 2). При этом оказывается, что такая модель имеет значительное сходство с тестовой 39ти узловой схемой IEEE [4], являющейся упрощенным аналогом энергосистемы северо-восточного побережья США (штат Нью-Йорк и примыкающие ОЭС).

Неоднократно показано [5, 6], что показатели статической и особенно динамической устойчивости данной системы являются чрезвычайно низкими. Например, при трехфазном проходящем коротком замыкании в узле 22 его предельная длительность составляет 0,185 с.

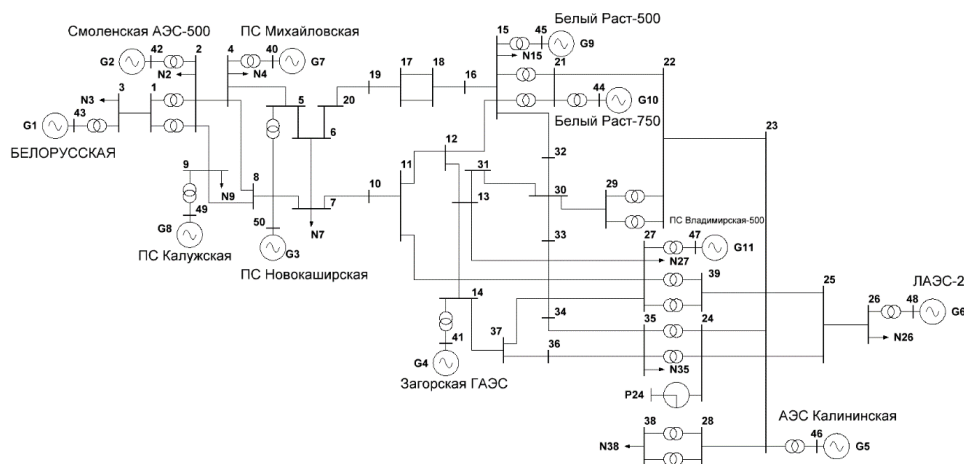


Рис. 2. Графическое представление связей ОЭС Северо-запад – Центр – Беларусь
 Fig. 2. Graphical representation of interconnections between North-West – Center– Belarus UPS

Для повышения указанных показателей предлагается дополнить традиционный регулятор частоты и мощности (АРЧМ) обратными связями по данным мониторинга переходных режимов, полученных на различных подстанциях ЭЭС. При рассмотрении указанной транзитной структуры до некоторой степени очевидно, что наиболее репрезентативным *глобальным* параметром будет угол между векторами напряжений на шинах генераторов 1 и 6. Во всех представленных далее вариантах выполняется оптимизация параметров систем управления (коэффициентов регулирования по разнице углов между векторами напряжений k_{δ} и ее второй производной k_{δ}'' , а также задержек на измерение, преобразование и передачу этих сигналов T_{δ} и T_{δ}'') с использованием обобщенного правила площадей (рис. 4). Например, применение только одной дополнительной обратной связи по углу с коэффициентом $k_{\delta} = -1$ на одном эквивалентном генераторе 1 (ОЭС Беларуси) позволяет увеличить предельную длительность отключения короткого замыкания (КЗ) в узле 22 до 0,23 с или на 24%.

В то же время в узлах удаленных от точки КЗ (особенно в ОЭС Беларуси и на примыкающих подстанциях) падение напряжения практически незаметно. Поэтому мощность нагрузки в этом районе остается неизменной и возникает необходимость даже увеличения мощности турбин с учетом электромеханических качаний в послеаварийном режиме (рис. 3).

При этом показатели статической устойчивости также претерпевают некоторые изменения, что в случае применения регуляторов мощности турбин обычно не оценивается. В частности, частота колебаний доминирующей составляющей движения увеличивается с исходных 1,08 до 1,59 рад/с (первые два столбца табл. 1), а ее демпфирование даже незначительно снижается с 0,29 до 0,217 1/с. Это означает, что колебательная статическая устойчивость несколько ухудшается, однако далее будет показано, что внедрение обратных связей по взаимным (глобальным) параметрам на большем числе генераторов имеет положительное влияние на управляемость энергообъединения [7].

Можно быть показано, что влияние запаздывания дополнительных обратных связей по разнице фаз векторов напряжений и ее второй производной (исходные постоянные каналов регулирования $T_{\delta} = T_{\delta}'' = 0,3$ снижаются до 0,1 с) на переходные процессы и устойчивость системы в целом состоит в снижении размаха колебаний и улучшении демпфирования колебаний.

Внедрение обратных связей по углу и его второй производной в системах регулирования турбин сразу двух генераторов (**Белорусская (1):** $k_{\delta} = -1$, $k_{\delta}'' = -0,8$; **ЛАЭС (6):** $k_{\delta} = 3$; $k_{\delta}'' = 1$) позволяет увеличить предельную длительность КЗ в узле 22 до 0,422 с, то есть более чем в два раза.

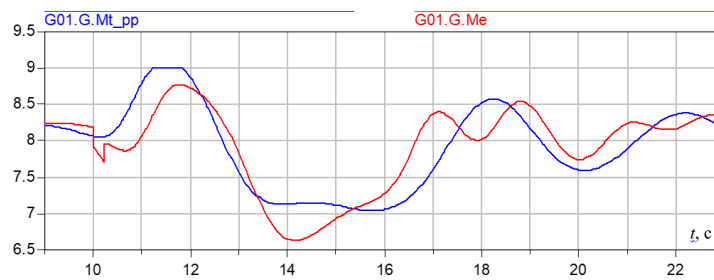


Рис. 3. Кривые механического и электромагнитного моментов генератора G1
 Fig. 3. Mechanical and electromagnetic torque curves of generator G1

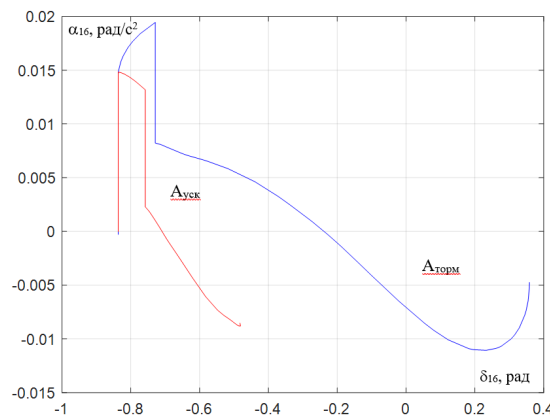


Рис. 4. Площади взаимного ускорения генератора 1 относительно генератора 6
 (синяя— регулирование по частоте, красная — по частоте и углу)
 Fig. 4. Mutual acceleration of generator 1 relative to generator 6 (blue curve shows when
 only frequency control is introduced and red one shows when angle control is applied)

Влияние дополнительного регулирования по взаимным параметрам на динамическую устойчивость рассматриваемой транзитной структуры наиболее полно проявляется при построении площадей ускорения и торможения двух управляемых эквивалентных генераторов относительно друг друга (ОЭС Беларуси относительно энергосистемы Северо-запада, рис. 4). Существенное снижение указанных площадей отражает повышение уровня динамической устойчивости энергосистемы.

Частота колебаний доминирующей составляющей движения увеличивается с исходных 1,08 до 2,83 и 3,25 рад/с (третий столбец табл. 1). Однако основной эффект введения управления по углу в разных частях энергообъединения состоит в значительном увеличении показателей демпфирования с 0,29 до 0,63 и 0,86 1/с, то есть в два-три раза. Таким образом, при регулировании по разнице фаз векторов напряжений в различных частях транзитной структуры ее колебательная статическая устойчивость существенно растет.

Влияние дополнительного регулирования мощности турбины при глобальном управлении

При росте количества генераторов, АРЧМ которых оснащены обратными связями по глобальным параметрам (синхронизированным данным СМНР), значительно растет как уровень колебательной статической устойчивости ЭЭС (четвертый столбец табл. 1), так и показатели динамической устойчивости (табл. 2).

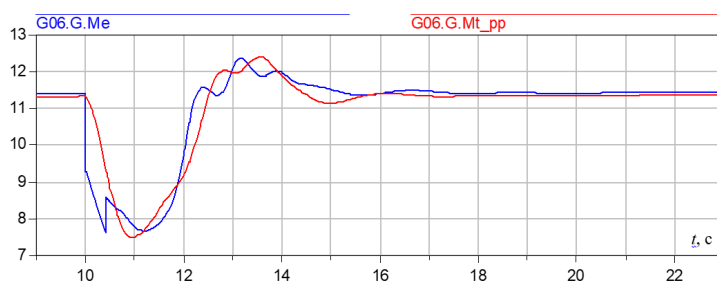


Рис. 5. Кривые механического и электромагнитного моментов генератора G6
 Fig. 5. Mechanical and electromagnetic torque curves of generator G6

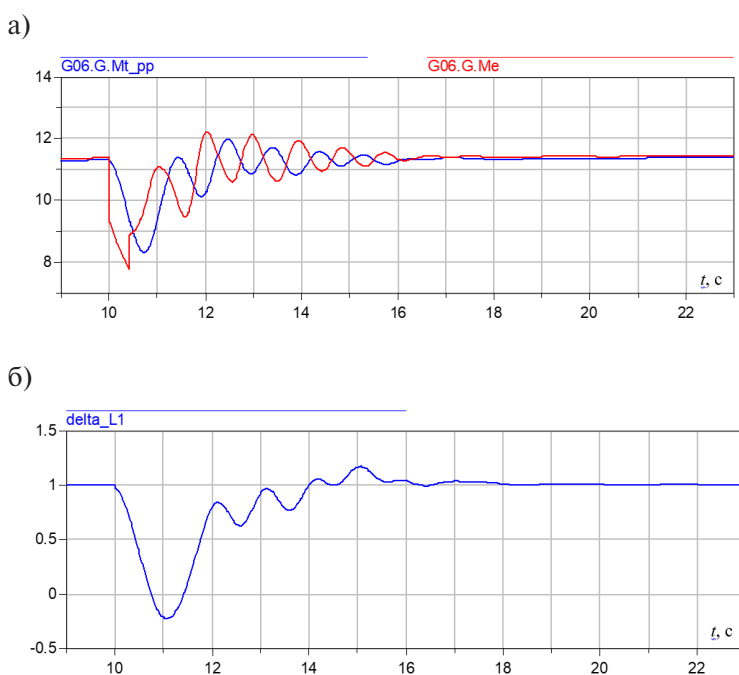


Рис. 6. Баланс моментов на валу эквивалентного генератора G6 (а) и зависимость угла между векторами напряжений при регулировании по взаимным параметрам (б)
 Fig. 6. Torque balance on equivalent generator G6 (a) and phasor difference in case of mutual parameter control application (b)

Внедрение каналов по углу и производным в системах регулирования турбин четырех генераторов (**Белорусская (1):** $k_{\delta} = -0,85$, $k_{\delta}'' = -0,9$; **Смоленская (2):** $k_{\delta} = -0,55$, $k_{\delta}'' = -0,35$; **Калининская (5):** $k_{\delta} = -1$, $k_{\delta}'' = -0,8$; **ЛАЭС (6):** $k_{\delta} = 3$; $k_{\delta}'' = 1$) позволяет увеличить предельную длительность КЗ в узле 22 до 0,864 с, то есть более чем в четыре раза по сравнению с исходным вариантом.

Положительный эффект распределения управления на большее количество генераторов состоит в том, что механический момент каждого из них снижается в меньшей степени, чем в предыдущих случаях. Например, из кривых момента турбины генератора 6, представленных на рис. 5 и 6, а видно, что работа генератора 5 уменьшает воздействие на шестой во втором варианте. При этом суммарное снижение мощности составляет порядка 4 о.е. В то же время в избыточной системе (ОЭС Беларуси) увеличение мощности при послеаварийных качаниях (по аналогии с кривыми на рис. 3) более равномерно распределяется между генераторами 1 и 2.

В табл. 1 сведены все возможные варианты расчетов колебательной статической устойчивости при различном числе генераторов, вовлеченных в управление мощностью по данным мониторинга переходных режимов. Необходимо отметить, что координированное управление одновременно и в избыточной, и в дефицитной частях объединения дает прирост указанных показателей в два-три раза.

Таблица 1

Оценка статической устойчивости при различном охвате энергообъединения управлением по глобальным параметрам

Table 1

Small-signal stability calculations for different coverage of power interconnection by control using global parameters

Без дополнительного регулирования	Генератор 1	Генераторы 1 и 6	Генераторы 1, 2, 5, 6
-1.69 ± j4.62	-2.45 ± j8.22	-1.49 ± j1.361	-1.41 ± j1.37
-1.31 ± j5.19	-1.31 ± j5.2	-1.386 ± j0.894	-1.32 ± j5.201
-1.18 ± j0.32	-1.089	-1.31 ± j5.208	-1.32 ± j0.806
-1.119	-1.02 ± j0.19	-1.039 ± j0.358	-1.0023
-1.002	-1.0023	-1.0023	-0.994 ± j0.194
-0.295	-0.220	-0.864 ± j 3.25	-0.794 ± j3.38
-0.29 ± j1.08	-0.217 ± j1.59	-0.628 ± j 2.83	-0.581 ± j2.856
-0.211		-0.29565	-0.288
		-0.19663	-0.19482

Предельные длительности КЗ для различных подстанций энергообъединения и распределения глобального управления между генераторами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Предельная длительность КЗ в различных частях энергообъединения

Table 2

Critical fault-clearance time at various parts of electric power system

№ подстанции	Традиционное регулирование	Регулирование на двух генераторах	Регулирование на четырех генераторах
	$\Delta t_{\text{кз пред}}, \text{с}$		
2	0,195	0,235	0,29
22	0,185	0,422	0,864
25	0,091	0,41	—

Повышение управляемости энергообъединений на основе внедрения накопителей электрической энергии

Анализ характера изменения моментов турбин генераторов в различных частях энергосистемы (рис. 3, 5 и 6, а) приводит к рассмотрению возможности применения систем накопления электрической энергии, готовых выполнять ту же функцию управления балансом активной мощности, и в дефицитной, и в избыточной частях ЭЭС.

Современные накопители способны как выдавать, так и потреблять активную и реактивную мощности, причем делать это независимо и с чрезвычайно высоким быстродействием [8, 15]. Такого рода системы безусловно необходимы при наличии в ОЭС большой доли солнечных и

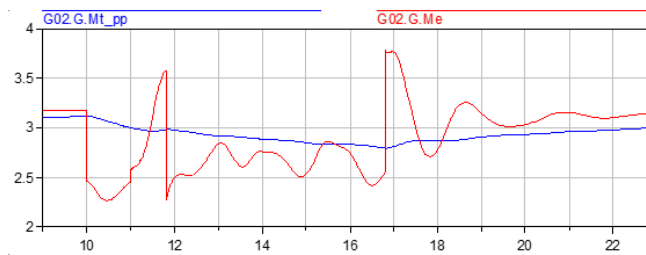


Рис. 7. Качания электромагнитного (красный) и механического (синий) моментов генератора 2 в аварийном и послеаварийном режимах

Fig. 7. Electromagnetic (red) and mechanical (blue) torques oscillations of generator G2 in emergency and post-emergency modes

в меньшей степени ветряных электрических станций. При этом с турбины генератора в переходных процессах снимается задача изменения мощности в достаточно больших диапазонах и с высокими скоростями. Наибольшее распространение на данный момент получают системы аккумуляторного типа [12, 13].

В этой связи исходная динамическая модель транзитной структуры «Северо-запад – Центр – Беларусь» на языке Modelica была оснащена двумя устройствами подобного вида, установленными на шинах Смоленской АЭС (узел 2) и подстанции Ленинградская 750 кВ (узел 25). При этом в модели ЭЭС накопитель представляет собой активную-индуктивную проводимость (нагрузка, записанная с обратным знаком), а его включение в какой-либо из частей ОЭС приводит к блокированию в ней же дополнительных каналов АРЧМ по данным СМПР.

С другой стороны, эти же данные СМПР могут быть использованы в алгоритме включения конкретного накопителя. Если отклонение разницы фаз векторов напряжений в дефицитной и избыточной частях ЭЭС становится отрицательным (см. в качестве примера рис. 6, б), выдается команда на увеличение мощности накопителя на подстанции 2. В противоположной ситуации срабатывает накопитель в точке 25.

Рассмотрим в качестве иллюстрации КЗ в точке 22, при котором ОЭС Северо-запада становится избыточной частью, а ОЭС Беларуси дефицитной. На расположенных справа на схеме эквивалентных генераторах 5 и 6 функционируют АРЧМ с каналами по глобальным параметрам по аналогии с тем, как это было представлено в предыдущем разделе, при этом выбранные ранее параметры также не изменяются. На ближайших же к ОЭС Беларуси (левая часть схемы) генераторах 1 и 2 каналы по данным СМПР отключаются, работает только традиционное регулирование по частоте и дается команда на ввод в работу системы накопления на подстанции 2. Как уже было отмечено, такое срабатывание зависит от знака отклонения угла между векторами напряжений, который в данном является отрицательным. Последующие расчеты динамической устойчивости показывают, что предельная длительность КЗ в этом случае увеличивается до 0,99 с или в пять раз.

Применение систем накопления энергии позволяет значительно увеличить быстродействие управления балансом активной мощности в ЭЭС по сравнению с действием АРЧМ генераторов, однако скачкообразное изменение электромагнитных моментов (рис. 7) приведут к повышению скручивающих моментов валопроводов агрегатов, что является недопустимым. В этой связи в систему регулирования накопителя вводится некоторая искусственная инерция, соответствующая по величине (но обязательно меньшая) механическим инерционным постоянным турбоагрегатов.

Наиболее простым способом реализации такой инерции является экспоненциальное изменение мощности системы накопления энергии при его вводе в работу $G_n = (G_{\max} - G_0)(1 - e^{-t/\tau})$, а также выводе из нее $G_n = (G_{\max} - G_0)e^{-t/\tau}$. При этом предельная мощность G_{\max} и инерцион-

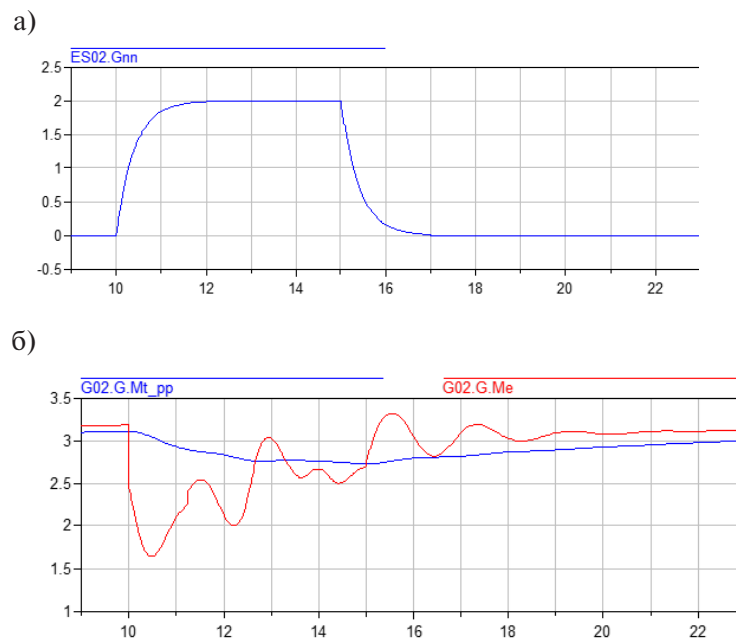


Рис. 8. Изменение проводимости накопителя по экспоненциальному закону (а) и баланс моментов на валу эквивалентного генератора Gб (б)

Fig. 8. Conductivity of energy storage device according to exponential law (a) and torque balance on equivalent generator shaft Gб (b)

ность управления τ может быть рассчитана по небалансам моментов соответствующих генераторов (в данном опыте в ОЭС Беларуси) и кривым взаимного ускорения для случая работы АРЧМ генераторов с каналами по данным СМПР (рис. 4).

Внедрение систем накопления энергии с описанным выше алгоритмом работы позволяет увеличить предельную длительность КЗ в точке 22 до 1,24 с, то есть, почти в семь раз (табл. 3).

Таблица 3

Предельная длительность КЗ в различных частях энергообъединения

Table 3

Critical fault-clearance time at various parts of electric power system

№ подстанции	Традиционное регулирование	Регулирование на четырех генераторах
	$\Delta t_{\text{кз пред}}, \text{с}$	
система накопления энергии с искусственной инерцией		
2	0,195	0,3
22	0,185	1,24
координация работы накопителя с действием АРЧМ		
2	0,195	0,38

При оптимизации параметров систем управления по данным СМПР, выполненной в предыдущем разделе, предполагалась необходимость их согласования при установке в различных частях транзитной структуры. В случае, когда один или несколько таких регуляторов заменяет работа накопителя, параметры остальных АРЧМ могут быть существенно пересмотрены уже с учетом внедрения систем накопления.

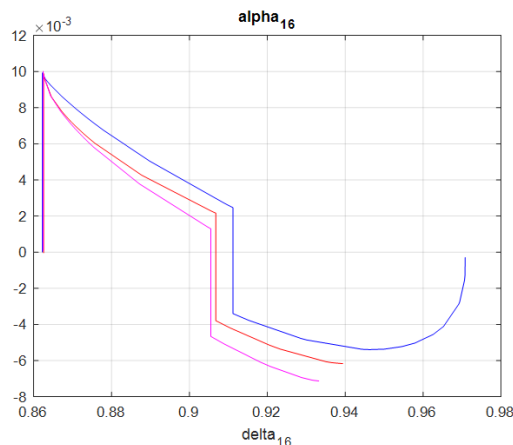


Рис. 9. Взаимное ускорение генераторов 1 и 6 относительно друг друга (синяя – согласованное регулирование четырех АРЧМ, красная – регулирование генераторов 1-2 и инерционный накопитель на подстанции 25, сиреневая – уточненная координация генераторов 1-2 с накопителями на ПС 2 и 25)

Fig. 9. Mutual acceleration of generators 1 and 6 relative to each other (blue – coordinated control by four AGCs, red – generators 1-2 control and inertial storage at substation 25, purple – refined coordination of generators 1 and 2 with storage devices at substations 2 and 25)

Дальнейшее снижение площадей ускорения (рис. 9, красная и сиреневая кривые) оказалось возможным за счет следующих одинаковых настроек каналов АРЧМ по глобальным параметрам – **Белорусская (1) и Смоленская (2):** $k_{\delta} = -1,9$, $k_{\delta}'' = -1,5$. При этом важно подчеркнуть, что параметры на генераторе 1 увеличились почти в два раза, а на генераторе 2 – в три раза. Таким образом, увеличивается и сигнал управления турбиной, благодаря чему и происходит увеличение уровня динамической устойчивости. При сегодняшнем уровне реализации цифровых систем регулирования, указанные параметры (коэффициенты k_{δ} , k_{δ}'' и постоянные времени T_{δ} , T_{δ}'') могут изменяться непосредственно в темпе переходного процесса, а выбор величин зависит от анализа глобальных параметров и наличия или отсутствия систем накопления энергии в различных частях ЭЭС.

Возможность работы накопителя как на выдачу, так и на потребление активной мощности была проверена и в данном случае, при этом рассмотрена возможность повышения предельной длительности КЗ в левой части схемы (узел 2). Управление АРЧМ по глобальным параметрам на генераторах 1-2 и блокирование этих обратных связей на генераторах 5-6 в предположении ввода в работу накопителя на подстанции 25, а через некоторое время (1 с, то есть в послеаварийном режиме при отключении непосредственно короткого замыкания) также и в узле 2 позволило увеличить предельное время КЗ в узле 2 до 0,38 с, то есть почти на 50%.

Выводы по работе

Разработана динамическая модель транзитной структуры «Северо-запад – Центр – Беларусь» на языке Modelica. Показано, что она имеет значительное сходство с аналогичной по размеру тестовой схемой IEEE, являющейся упрощенным аналогом энергосистемы северо-восточного побережья США. Выявлено, что такого рода система имеет достаточно низкие показатели статической и особенно динамической устойчивости.

Предложено дополнить классический регулятор АРЧМ обратными связями по глобальным параметрам (разница фаз векторов напряжений и ее вторая производная), полученным на различных подстанциях ЭЭС. Показано, что при внедрении такой системы регулирования даже на двух мощных эквивалентных генераторах динамическая устойчивость транзита увеличивается

как минимум в два раза. Кроме того, существенно растут (также примерно вдвое) и показатели колебательной статической устойчивости.

При увеличении числа генераторов, оснащенных системой регулирования по взаимным параметрам (глобальный охват ЭЭС) показатели динамической устойчивости увеличиваются уже более чем в четыре раза, а колебательной статической почти в три раза.

Обоснована возможность внедрения накопителей электрической энергии в рассматриваемой транзитной структуре. Наиболее целесообразными местами для их установки приняты подстанции Белорусская и Ленинградская. Предложен оптимальный закон управления накопителями, в том числе в координации с действием АРЧМ генераторов в различных частях энергообъединения, позволяющий повысить уровень динамической устойчивости практически в шесть раз.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Martin K.** Synchronphasors Point the Way: The Emergence of a New Technology, in *IEEE Electrification Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 10–24, March 2021.

[2] **Siddiqui S.A., Verma K., Niazi K.R., Fozdar M.** Real-Time Monitoring of Post-Fault Scenario for Determining Generator Coherency and Transient Stability Through ANN, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 685–692, Jan.-Feb. 2018.

[3] **Wilches-Bernal et al.** "Forced Oscillations in the Western Interconnection with the Pacific DC Intertie Wide Area Damping Controller," 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2020, pp. 1–5.

[4] **Canizares C. et al.** "Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 715–722, Jan. 2017.

[5] **Першко Е.А., Беляев А.Н.** Повышение устойчивости энергосистем на основе управления по данным мониторинга переходных режимов // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*, № 86, 2022, С. 87–98.

[6] **Недоливко А.В., Беляев А.Н.** Повышение динамической устойчивости транзитных электропередач переменного тока на основе применения данных систем мониторинга переходных режимов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.* – СПб., 2016. – № 4 (254). – С. 106–115.

[7] **Karnaukhova P.A., Pershko E.A., Belyaev A.N.** "Increasing the Transient Stability of Large Energy Pools Based on Wide Area Measurement System Control," 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021, pp. 1441–1445.

[8] **Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А.** Системы накопления энергии: Российский и зарубежный опыт // *Энергетическая политика*. 2020. № 6 (148). С. 76–87.

[9] **Pershko E.A., Demidov G.D., Illarionova S.V., Verner S.V., Belyaev A.N.** "Application of Wide-Area Measurement Data in Control Algorithms for Power System Stability Enhancement," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2022, pp. 1248–1253.

[10] **Zenelis, Wang X., Kamwa I.** "Online PMU-Based Wide-Area Damping Control for Multiple Inter-Area Modes," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 5451–5461, Nov. 2020.

[11] **Rodrigues Y.R., Abdelaziz M., Wang L., Kamwa I.** "PMU Based Frequency Regulation Paradigm for Multi-Area Power Systems Reliability Improvement," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 5, pp. 4387–4399, Sept. 2021.

[12] **Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Ковальчук М.С., Абдалла В., Сериков В.А., Зимин Р.Ю., Архипова И.А.** Тенденции развития промышленных накопителей энергии для устойчивого развития предприятий минерально-сырьевого комплекса // *Горная промышленность*. 2021. № S5-2. С. 89–96.

[13] **Sioshansi R. et al.** "Energy-Storage Modeling: State-of-the-Art and Future Research Directions," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 860–875, March 2022.

[14] **Guzman N.S., Cañizares C.A., Bhattacharya K., Sohm D.** "Frequency Regulation Model of Bulk Power Systems with Energy Storage," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 2, pp. 913–926, March 2022.

[15] **Куликов Ю.А.** Накопители электроэнергии - эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем / Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы 9 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Казань, 1–5 окт. 2018 г. В 3 т. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2018. – Т. 1. – С. 38–43.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАХАРЯН Екатерина Алексеевна – аспирант высшей школы электроэнергетических систем, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: ekaterinapershk@rambler.ru

БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

REFERENCES

[1] **K. Martin**, Synchrophasors Point the Way: The Emergence of a New Technology, in IEEE Electrification Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 10–24, March 2021

[2] **S.A. Siddiqui, K. Verma, K.R. Niazi, M. Fozdar**, Real-Time Monitoring of Post-Fault Scenario for Determining Generator Coherency and Transient Stability Through ANN, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 1, pp. 685–692, Jan.–Feb. 2018.

[3] **Wilches-Bernal et al.**, "Forced Oscillations in the Western Interconnection with the Pacific DC Intertie Wide Area Damping Controller," 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2020, pp. 1–5.

[4] **C. Canizares et al.**, "Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 1, pp. 715–722, Jan. 2017.

[5] **Ye.A. Pershko, A.N. Belyayev**, Increasing the stability of power systems based on wide area monitoring data control // News of the scientific and technical center of Unified Energy System, № 86, 2022, С. 87–98.

[6] **A.V. Nedolivko, A.N. Belyayev**, Improving the transient stability of AC power transmission based on application of wide area measurement systems // St. Petersburg State Polytechnical University Journal.– SPb., 2016.– № 4 (254).– S. 106–115.

[7] **P.A. Karnaukhova, E.A. Pershko, A.N. Belyaev**, "Increasing the Transient Stability of Large Energy Pools Based on Wide Area Measurement System Control," 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2021, pp. 1441–1445.

[8] **V.M. Zyryanov, N.G. Kiryanova, I.Yu. Korotkov, G.B. Nesterenko, G.A. Prankevich**, Energy storage systems: Russian and foreign experience // Energy Policy. 2020. № 6 (148). s. 76–87.

[9] **E.A. Pershko, G.D. Demidov, S.V. Illarionova, M.E. Verner, A.N. Belyaev**, "Application of Wide-Area Measurement Data in Control Algorithms for Power System Stability Enhancement," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2022, pp. 1248–1253.

[10] **Zenelis, X. Wang, I. Kamwa**, "Online PMU-Based Wide-Area Damping Control for Multiple Inter-Area Modes," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 6, pp. 5451–5461, Nov. 2020.

[11] **Y.R. Rodrigues, M. Abdelaziz, L. Wang, I. Kamwa**, "PMU Based Frequency Regulation Paradigm for Multi-Area Power Systems Reliability Improvement," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 5, pp. 4387–4399, Sept. 2021.

[12] **G.A. Ustinov, Yu.A. Sychev, M.S. Kovalchuk, V. Abdalla, V.A. Serikov, R.Yu. Zimin, I.A. Arkhipova**, Trends in the development of industrial energy storage devices for sustainable development of enterprises of mineral resource complex // Mining industry. 2021. № S5-2. S. 89–96.

[13] **R. Sioshansi et al.**, "Energy-Storage Modeling: State-of-the-Art and Future Research Directions," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 2, pp. 860–875, March 2022.

[14] **N.S. Guzman, C.A. Cañizares, K. Bhattacharya, D. Sohm**, "Frequency Regulation Model of Bulk Power Systems with Energy Storage," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 2, pp. 913–926, March 2022.

[15] **Yu.A. Kulikov**, Energy storage devices as an effective tool for electrical power system operation control / Electric power industry through the eyes of youth – 2018: Proceedings of 9 youth international conference, Kazan, 1–5 okt. 2018 g. V 3 t. – Kazan: Kazan st.energy university, 2018. – T. 1. – S. 38–43.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ekaterina A. ZAKHARYAN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: ekaterinapershk@rambler.ru

Andrey N. BELYAEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

Поступила: 27.04.2023; Одобрена: 31.10.2023; Принята: 16.11.2023.

Submitted: 27.04.2023; Approved: 31.10.2023; Accepted: 16.11.2023.