

А.Ю. СТАРОСТИН, магистрант ЭНМ2-51 (НГТУ)
Научный руководитель В.М. ЗЫРЯНОВ, к.т.н., с.н.с. (НГТУ)
г. Новосибирск

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЧАУН-БИЛИБИНСКОГО ЭНЕРГОУЗЛА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Чаун-Билибинский энергоузел (ЧБЭ) является в России уникальным примером изолированной энергосистемы, которая включает в себя единственную в мире плавучую атомную теплоэлектростанцию (ПАТЭС) «Академик Ломоносов».

ЧБЭ состоит из двух основных узлов соизмеримой мощности (Билибино и Певек), соединённых между собой двумя одноцепными воздушными линиями (ВЛ) 110 кВ, общая протяженность которых более 480 км. Суровые климатические условия ЧБЭ и необычно большая для напряжения 110 кВ протяженность ВЛ обостряют вопрос сохранения динамической устойчивости энергосистемы при самоустраниющихся коротких замыканиях (КЗ). Кроме того, задача усложняется резкоизмененным характером нагрузки, обусловленным работой предприятий горнодобывающей промышленности.

Для повышения эффективности и надежности работы энергосистемы среди прочих рассматривается вариант установки в ЧБЭ системы накопления энергии (СНЭ) для замещения вращающегося резерва на дизельной электростанции (ДЭС) в Билибино и комплексного решения таких задач, как компенсация резко-измененной нагрузки, повышение качества электроэнергии и т.д.. Дополнительно к этим задачам в работе предлагается, учитывая малое время отклика СНЭ (не более 5 мс), использовать её для повышения динамической устойчивости ЧБЭ [1].

Для этого предлагается применить способ точной синхронизации в цикле АПВ при самоустраниющихся КЗ на воздушной линии, предложенный в [2].

Согласно ему активная мощность СНЭ должна изменяться в процессе управления во время бестоковой паузы АПВ по выражению (1):

$$P_y(t) = P_t(t) - P_h(t) + \frac{4T_j s(t)}{t_{\text{АПВ}} - t} + \frac{6T_j \Delta \delta(t)}{(t_{\text{АПВ}} - t)^2}, \quad (1)$$

где $P_y(t)$ – активная мощность СНЭ (мощность управления); $P_t(t)$ – механическая мощность приводного двигателя генераторного агрегата; $P_h(t)$ – мощность собственной нагрузки генератора без учета мощности СНЭ; T_j –

механическая постоянная времени генераторного агрегата; $\Delta\delta(t)$ – текущее значение выбега угла ротора генератора; $s(t)$ – текущее значение скольжения (скорость изменения выбега угла ротора генератора); $t_{\text{АПВ}}$ – время бестоковой паузы АПВ (время управления); t – текущее время управления, отсчитываемое с начального момента подачи управляющего сигнала на СНЭ (начала бестоковой паузы АПВ) [2].

При изменении мощности СНЭ по выражению (1) в течение бестоковой паузы $t_{\text{АПВ}}$ в момент повторного включения линии угол выбега генератора и его первая производная (скольжение) будут равны нулю, что исключает послеаварийные качания в энергосистеме. Схема электропередачи (рисунок 1), на которой реализуется предложенный способ, содержит синхронный генератор (1), приводной двигатель (2), повышающий трансформатор (3), систему накопления электрической энергии (4), микроконтроллер (5), выключатели (6,7), нагрузку на шинах синхронного генератора (8), линию электропередачи (9), энергосистему неограниченной мощности (10), точку короткого замыкания (11), датчики напряжения (12,13), датчик механической мощности приводного двигателя (14), датчик скорости вращения вала генератора (15), датчик мощности нагрузки (16) [2].

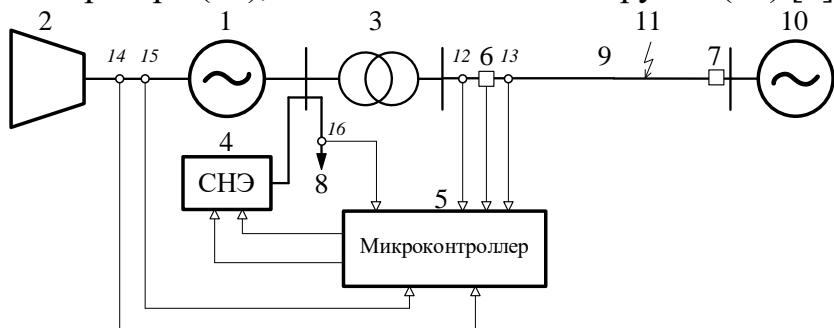


Рис. 1. Схема электропередачи генератор-линия-система неограниченной мощности

Для реализации этого способа достаточно использовать значение выбега угла генератора и его скорость изменения относительно системы неограниченной мощности, который измеряется со стороны генератора.

Способ [2] применим и для «двуухмашинной» энергосистемы (рисунок 2), в которой двухцепная линия электропередачи соединяет электростанции соизмеримой мощности [3]. Но в этом случае вместо абсолютного угла выбега необходимо использовать взаимный угол между двумя электростанциями, отделившимися друг от друга на время бестоковой паузы АПВ, который может быть рассчитан с привлечением технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) по замерам векторов напряжений по концам линии электропередачи.

Следует также учитывать сохранение электрической связи между двумя станциями, то есть наличие перетока мощности по оставшейся в работе линии. В этом случае выражение (1) принимает следующий вид (2):

$$P_y(t) = P_t(t) - P_h(t) - P_l(t) + \frac{4T_{j_3}S(t)}{t_{\text{АПВ}} - t} + \frac{6T_{j_3}\Delta\delta(t)}{(t_{\text{АПВ}} - t)^2}, \quad (2)$$

где $P_l(t)$ – активная мощность, отдаваемая в приемную систему по оставшейся в работе цепи; T_{j_3} – эквивалентная механическая постоянная времени энергосистемы.

Схема реализации способа показана на рисунке 2, где электростанции соизмеримой мощности (1,10), приводной двигатель (2), трансформаторы (3,15), система накопления электрической энергии (4), микроконтроллер (5), выключатели (6a,6b,7a,7b), нагрузка (8), две цепи электропередачи (9a,9b), точка короткого замыкания (11), датчики мощности линий электропередачи (12a,12b), датчики напряжения (13a,13b,17,18,19), датчик механической мощности (14), датчик мощности нагрузки (16). Выбег взаимного угла электропередачи и скорость его изменения (скольжение) рассчитываются микроконтроллером 5 по замерам векторов напряжений с шин генераторов, полученных с датчиков (17) и (19) с привлечением технологии СВИ.

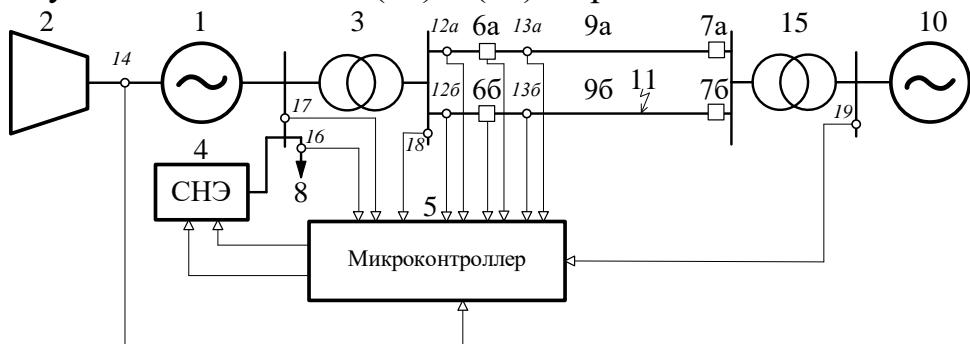


Рис. 2. Схема подачи сигналов в микроконтроллер при работе двух электростанций соизмеримой мощности

Для подтверждения эффективности предложенного способа повышения динамической устойчивости ЧБЭ составлена эквивалентная двухмашинная схема (рисунок 3) – в Билибино сосредоточена значительная промышленная нагрузка и ДЭС (25 МВт), а в Певеке – ПАТЭС (70 МВт) и Арктическая ТЭС (50 МВт). Номинальная мощность СНЭ принята равной мощности ДЭС 25 МВт. Математические модели эквивалентных генераторных агрегатов приёмной и передающей части энергосистемы дополнены моделями автоматических систем регулирования скорости и возбуждения (АРС, АРВ) с типовыми характеристиками.

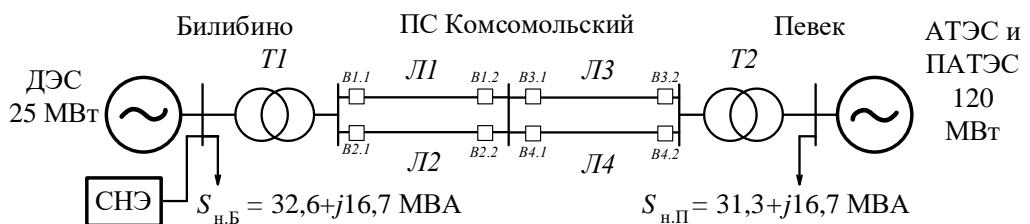


Рис. 3. Двухмашинная эквивалентная схема энергосистемы ЧБЭ

Расчёты переходных процессов в этой схеме проводились в ПВК *MATLAB Simulink*.

Рассмотрены три основных сценария развития аварийных ситуаций, происходящих в энергосистеме при самоустраниющихся коротких замыканиях (длительность КЗ – 0,18 с) на воздушной линии с последующим автоматическим повторным включением (время бестоковой паузы АПВ – 1 с). В каждом из них рассчитывались два варианта: без участия СНЭ и с участием СНЭ в управлении переходным процессом.

1. Трёхфазное КЗ на линии Л2 с последующим успешным АПВ при сохранении связи между станциями по линии Л1 приводит к нарушению динамической устойчивости энергосистемы без СНЭ. Участие СНЭ обеспечивает успешный динамический переход без послеаварийных качаний (рисунок 4).

2. Двухфазное КЗ на землю на линии Л2 с последующим успешным АПВ при сохранении связи между станциями по линии Л1 приводит также к нарушению динамической устойчивости энергосистемы без СНЭ. При участии СНЭ динамическая устойчивость сохраняется без послеаварийных качаний (рисунок 5).

3. Двухфазное КЗ без земли на линии Л2, вызванное междуфазным контактом во время «пляски» проводов, не приводит к нарушению динамической устойчивости, но без участия СНЭ в энергосистеме происходят значительные послеаварийные качания, а с участием СНЭ – динамический переход происходит без послеаварийных качаний (рисунок 6).

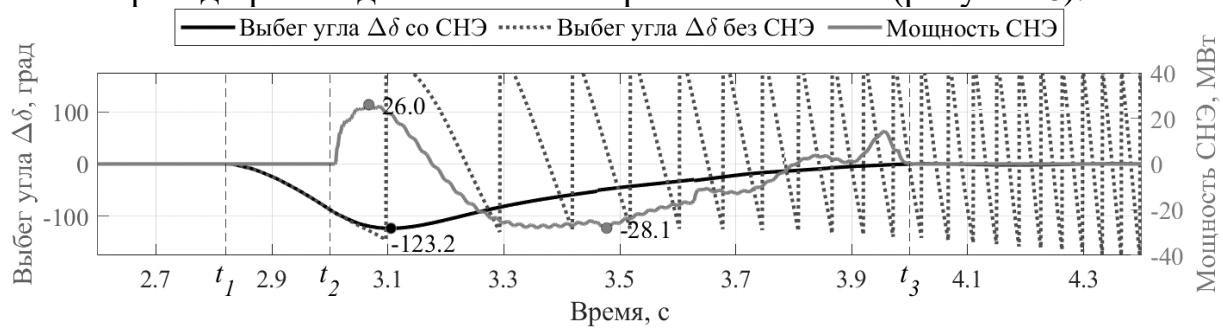


Рис. 4. Переходный процесс при трёхфазном КЗ на Л2

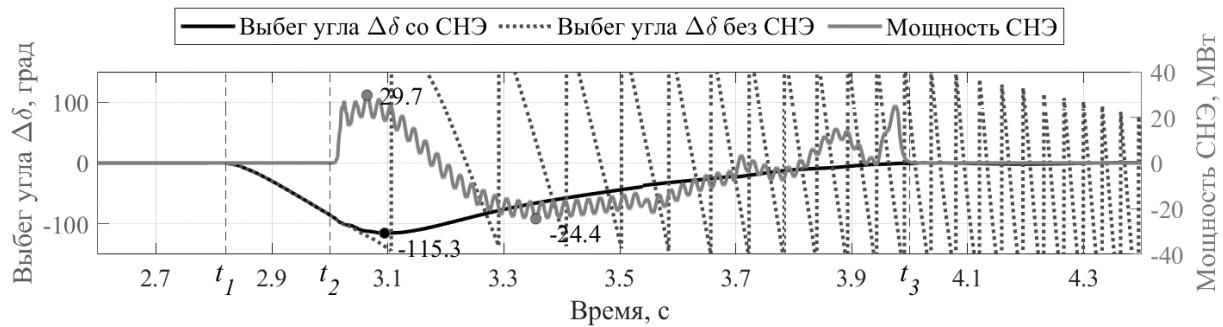


Рис. 5. Переходный процесс при двухфазном КЗ на землю на Л2

Результаты расчётов показали, что при реализации предложенного алгоритма управления СНЭ во всех рассмотренных сценариях обеспечивается динамическая устойчивость энергосистемы (рис.4,5) или (для более лёгких возмущений) кардинальное улучшение качества переходных процессов (рис.6). Обозначения на временной диаграмме: t_1 – момент возникновения КЗ (2,82 с); t_2 – отключение линии (3 с); t_3 – успешное срабатывание АПВ (4 с).

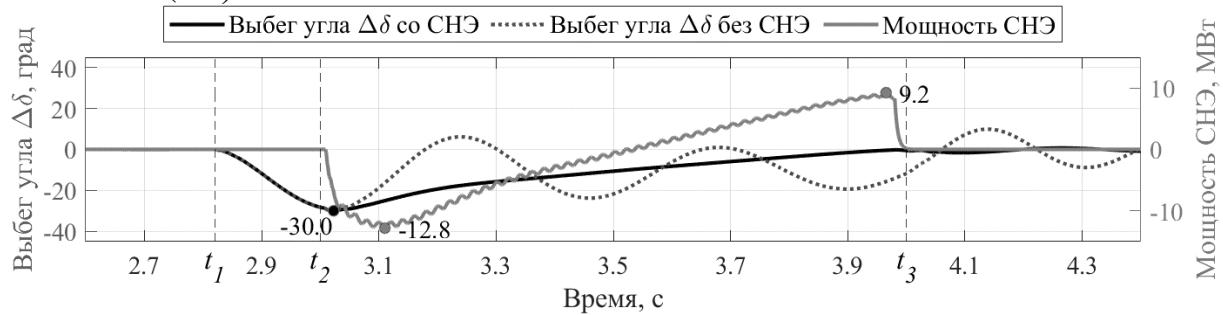


Рис. 6. Переходный процесс при двухфазном КЗ без земли на Л2

Вывод. Управление быстродействующей СНЭ в бестоковую паузу АПВ ВЛ в Чаун-Билибинском энергоузле по предложенному алгоритму с использованием технологии СВИ обеспечивает точную синхронизацию электростанций за время бестоковой паузы АПВ при отсутствии послеаварийных качаний. Предложенный алгоритм применим для любых «двуухмашинных» энергосистем при наличии в их составе СНЭ.

Список литературы:

1. Пранкевич Г.А. Разработка математической модели и методики выбора параметров накопителя энергии как элемента энергосистемы: дис. ... канд. техн. наук 05.14.02 / Пранкевич Г.А. – Нск., 2021. – 159 С.
2. Патент № 2845618 Российской Федерации, МПК H 02 J 3/42, H 02 Н 3/06. Способ точной синхронизации аварийно отделившегося генератора с энергосистемой на основе накопителя энергии : № 2024137182 : заявл. 11.12.2024 : опубл. 25.08.2025 / Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А. – 13 С.
3. Зырянов В.М. Основные характеристики сверхпроводящего индуктивного накопителя, как элемента энергосистемы и оценка возможности его применения для аварийного управления // канд. дисс. 1985. – 220 С.

Информация об авторах:

Старостин Андрей Юрьевич, магистрант, НГТУ, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20, andreysy357@gmail.com

Зырянов Вячеслав Михайлович, к.т.н., с.н.с., НГТУ, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20, vmyzuryanov47@gmail.com