

DOI 10.5862/JEST.214.6
УДК 621.313.322

А.Ю. Стогов, А.Н. Беляев

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

A.Yu. Stogov, A.N. Belyaev

THE IMPROVEMENT OF TRANSIENT STABILITY OF AUTONOMOUS POWER SYSTEMS BASED MONITORING TRANSITIONAL REGIME

В работе с помощью простейшей модели автономной электроэнергетической системы нефтедобывающего комплекса с преобладающей двигательной нагрузкой изучены возможности применения дополнительного регулирования возбуждения и мощности по отклонению взаимного угла между роторами синхронных машин для повышения уровня статической и динамической устойчивости. Исследована целесообразность внедрения дополнительных обратных связей по взаимному углу в системах регулирования генератора газотурбинной электростанции (системы АРВ и АРЧМ) и эквивалентного синхронного двигателя (АРВ) на основе совместного расчета областей D-разбиения и собственных значений матрицы переменных состояния. С использованием методов компьютерного моделирования рассмотрены возможности совместного регулирования АРЧМ газотурбинного агрегата и частотного привода синхронного двигателя для повышения уровня динамической устойчивости системы.

АВТОНОМНАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА; ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ; ГАЗОТУРБИННЫЙ АГРЕГАТ; АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ; АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ВОЗБУЖДЕНИЯ; АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ; СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ; ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПРИВОД.

The integration of additional excitation and load-frequency control on the basis of wide area measurement system data is investigated in a simple equivalent model of an oil-production enterprise autonomous power system with dominant motor load to improve small signal and transient stability. It is shown that small signal stability level can be substantially increased by applying the angle feedback in the power system stabilizer of synchronous generators and motors as well as gas turbine frequency control. Parameter optimization is primarily based on eigenvalue calculation and damping curve analysis. The principles of the combined gas turbine and variable frequency drive control are developed to improve autonomous power system transient stability, the level of which is deadly low at an oil- and gas production enterprise.

AUTONOMOUS POWER SYSTEM, TRANSIENT STABILITY, GAS TURBINE, INDUCTION MOTOR, AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR, POWER SYSTEM STABILIZER, AUTOMATIC LOAD-FREQUENCY CONTROL, WIDE AREA MEASUREMENT SYSTEM, VARIABLE FREQUENCY DRIVE.

Введение

Идея использования взаимных углов между векторами напряжений на шинах станций для целей вторичного регулирования была высказана еще в 50-х годах прошлого века, но в силу отсутствия необходимых технических средств не получила практического применения [1]. Впер-

вые передача параметров вектора напряжения противоположного конца ЛЭП по телеканалам или его моделирование были использованы только в 80-е годы в СССР [2].

Примерно в то же время в США, когда стала использоваться спутниковая система GPS, начался новый виток в развитии идеи использования взаимного угла, уже для нужд WAMS (от

англ. «wide area measurement system» — глобальная система измерений) [3]. На сегодняшний день WAMS получила широкое распространение в энергетике многих стран мира [4,5]. Опыт ее использования позволил выявить основные направления практического применения [6, 7], в числе которых верификация цифровых моделей энергосистем, мониторинг напряжений в узлах сети, анализ произошедших аварий и т. п.

Автономные электроэнергетические системы нефтегазодобывающих комплексов обладают рядом специфических особенностей, таких, как преобладание двигательной нагрузки, применение высокоманевренных газотурбинных и газопоршневых агрегатов, и, как следствие, характеризуются низким уровнем динамической устойчивости, а потому требуют отдельного рассмотрения [8].

Основная цель нашей работы — оценка в простейшей модели автономной электроэнергетической системы с преобладающей двигательной нагрузкой возможности повышения уровня статической и динамической устойчивости за счет дополнительного регулирования возбуждения и мощности по отклонению взаимного угла между роторами синхронных машин с использованием элементов российского аналога WAMS — системы мониторинга переходных режимов (СМПР).

При этом решаются следующие основные задачи:

исследование целесообразности внедрения и выбор настроечных параметров дополнительных обратных связей по взаимному углу в системах регулирования генератора газотурбинной электростанции (системы АРВ и АРЧМ) и эквивалентного синхронного двигателя (система АРВ);

изучение влияния постоянных времени дополнительных обратных связей по углу в регуляторах возбуждения и мощности, а также быстродействия канала подачи топлива газотурбинной установки на статическую устойчивость системы;

рассмотрение возможностей совместного регулирования АРЧМ газотурбинного агрегата и частотного привода синхронного двигателя для повышения уровня динамической устойчивости системы.

Моделирование энергосистемы

В ходе работы были рассмотрены статическая устойчивость и переходные процессы при конечных возмущениях в автономной электроэнергетической системе (ЭЭС), состоящей из газотурбинной электростанции, линии электропередачи и эквивалентного узла нагрузки, представленного эквивалентными синхронным и асинхронным двигателями, а также статической нагрузкой (шунт постоянной проводимости), моделирующей системы отопления и освещения (рис. 1). Суммарная доля двигательной нагрузки принята равной 95 % (60 % асинхронная и 35 % синхронная). Такое соотношение взято на основании расчетов, проводимых на кафедре «Электрические системы и сети» последние десять лет [8, 11].

Газовая турбина

Для моделирования газовой турбины использовалась упрощенная математическая модель (рис. 2). В ней присутствуют сумматоры, три апериодических звена, моделирующие регулятор скорости, позиционер клапана и систему подачи топлива, и блок ограничения сигнала управления [9]. Особое внимание стоит уделить системе подачи топлива, которая представлена звеном с достаточно большой постоянной времени (0,4 с). Интервал возможных значений отмеченной константы достаточно широк. В исходной модели принято одно из средних значений ($T_f = 0,4$ с), хотя система аналогичных установок других производителей может обладать более высоким быстродействием, в частности модель газовой турбины фирмы Hitachi имеет $T_f = 0,1$ с.

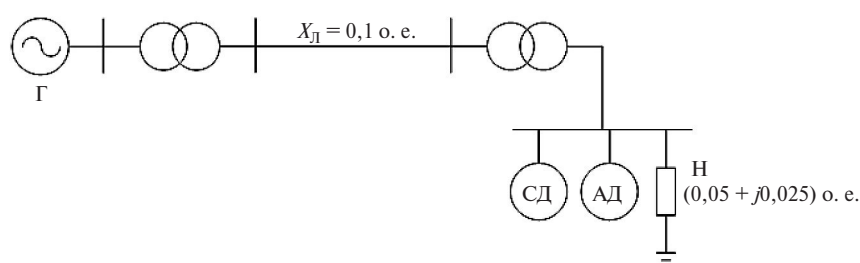


Рис. 1. Расчетная схема автономной электроэнергетической системы

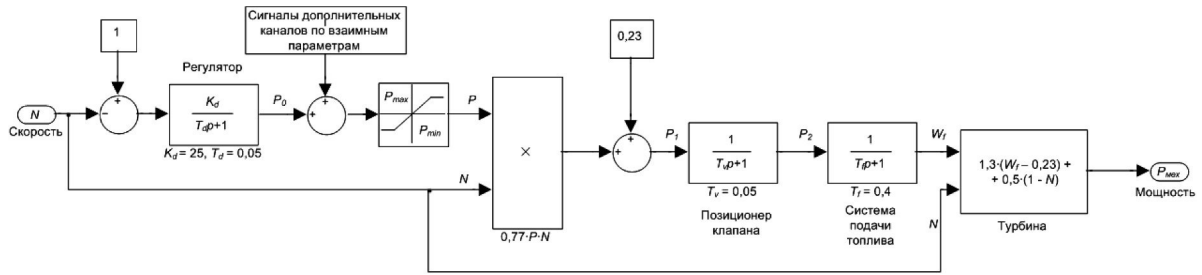


Рис. 2. Математическая модель регулятора частоты вращения газотурбинного агрегата

Синхронные генератор и двигатель

Описание переходных процессов в синхронном генераторе и двигателе выполнено на основании системы уравнений Парка — Горева в относительных единицах взаимного типа [10] без учета влияния быстропереходных процессов в статорных контурах.

Параметры эквивалентного синхронного генератора в собственных относительных единицах приняты следующие:

$$P_r = 1; Q_r = 0,55; x_d = 1,99; x_q = 0,99; \\ x'_d = 0,325; x''_d = 0,18; x'_q = 0,198; x_s = 0,144; \\ r_f = 0,00161; r_{rd} = 0,0199; r_{rq} = 0,009134; T_J = 12,2 \text{ с}$$

Здесь P_r — активная мощность генератора; Q_r — реактивная мощность генератора; x_d, x_q — соответственно продольное и поперечное синхронные индуктивные сопротивления; x'_d — переходное продольное индуктивное сопротивление; x''_d, x''_q — сверхпереходные продольное и поперечное индуктивные сопротивления; x_s — индуктивное сопротивление рассеяния; r_f — активное сопротивление обмотки возбуждения; r_{rd}, r_{rq} — активные сопротивления демпферных контуров соответственно в продольной и в поперечной осях; T_J — механическая инерционная постоянная.

В расчетах принято, что регулирование напряжения на шинах станции осуществляется за счет действия простейшего автоматического регулятора возбуждения (АРВ), содержащего только канал по отклонению напряжения на шинах станции (рис. 3). Аналогичная модель системы возбуждения используется также и для соответствующего эквивалентного синхронного двигателя на шинах нагрузки. Коэффициент регулирования k_{0u} принят во всех расчетах равным -10 , что соответствует статизму регулирования 10 %.

Параметры эквивалентного синхронного двигателя в собственных относительных единицах следующие:

$$P_{сд} = 0,35; x_d = 3,223; x_q = 2,089; x'_d = 0,829; \\ x''_d = 0,485; x''_q = 0,457; Q_{сд} = 0,163; x_s = 0,257; \\ r_f = 0,00178; r_{rd} = 0,0127; r_{rq} = 0,00871; T_J = 2,45 \text{ с}$$

Асинхронный двигатель

В нашей работе используется модель двухклеточного АД [11]. В целом математическая модель АД аналогична модели синхронного двигателя за исключением отсутствия уравнений обмотки возбуждения и автоматического регулятора возбуждения. Параметры АД следующие:

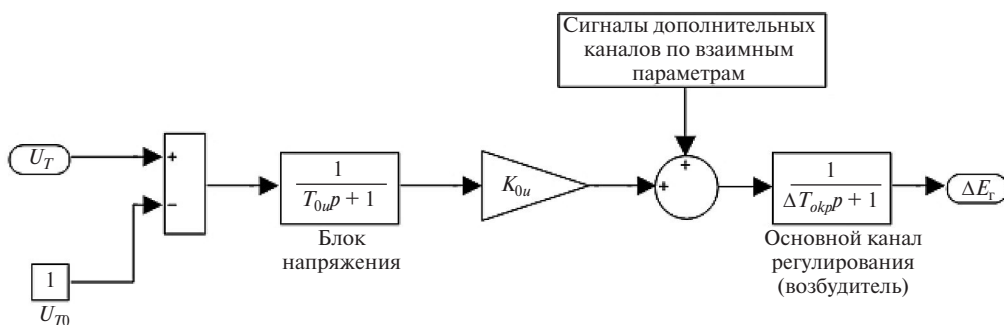


Рис. 3. Упрощенная модель автоматического регулятора возбуждения генераторов и синхронных двигателей

$$P_{\text{АД}} = 0,6; k_{\text{заг}} = 0,6; P_{\text{ст}} = 0,12; x_d = 6,532;$$

$$b_M = 1,2; x_S = 0,147; T_J = 3 \text{ с}; Q_{\text{АД}} = 0,3;$$

$$r_a = 0,0367; x_{\text{srd ном}} = 0,223; x_{\text{srd пуск}} = 0,118;$$

$$r_{\text{rd ном}} = 0,025; r_{\text{rd пуск}} = 0,053$$

Здесь $P_{\text{АД}}$ — активная мощность, потребляемая АД; $Q_{\text{АД}}$ — реактивная мощность, потребляемая АД; $k_{\text{заг}}$ — коэффициент загрузки; $P_{\text{ст}}$ — статический момент сопротивления; x_d — полное индуктивное сопротивление; b_M — кратность максимального момента; x_S — индуктивное сопротивление рассеяния; T_J — механическая инерционная постоянная; r_a — активное сопротивление статора; $x_{\text{srd ном}}$ — номинальное сопротивление рассеяния ротора; $x_{\text{srd пуск}}$ — пусковое сопротивление рассеяния ротора; $r_{\text{rd ном}}$ — номинальное активное сопротивление ротора; $r_{\text{rd пуск}}$ — пусковое активное сопротивление ротора.

Механическая мощность механизма, приводимого в движение асинхронным двигателем, описывается следующим образом [12]:

$$M_T = k_{\text{заг}} \left[P_{\text{ст}} + (1 - P_{\text{ст}}) \left(\frac{1-s}{1-s_{\text{ном}}} \right)^2 \right] \cos \varphi_{\text{ном}}.$$

Значения констант, используемых в формуле, приведены выше.

Оценка целесообразности внедрения и выбор настроечных параметров дополнительных обратных связей по взаимному углу для повышения уровня статической устойчивости системы

Анализ статической устойчивости энергосистемы производится на основании использования метода D-разбиения. Как известно, в классической интерпретации он предполагает следующее: получение аналитического выражения характеристического полинома через оптимизируемые параметры; последующую замену оператора дифференцирования p на $\alpha + j\beta$; разбиение исходного полинома на два уравнения; решение полученной системы относительно искомым параметров при варьировании частоты колебаний β в диапазоне электромеханических колебаний и нанесение точек решения на плоскость указанных коэффициентов.

Для решения поставленной задачи было необходимо расписать в аналитическом виде линейризованную модель системы, разрешенную

относительно искомым коэффициентов. Однако в настоящее время средства современной вычислительной техники и возможности математических программ таковы, что численное решение задачи реализуется значительно проще. Сущность применяемой методики состоит в варьировании в некотором диапазоне величин любых двух параметров исходной модели системы, ее численной линеаризации для каждой комбинации значений параметров, расчете ближайших к границе устойчивости собственных значений матрицы переменных состояния и выделении из этого требуемой информации [10, 13]. В самом простом случае, например при построении областей равного затухания, это могут быть только вещественные части ближайших к границе устойчивости комплексных корней [14].

Оценка статической устойчивости исходной модели ЭЭС — при отсутствии регулирования по взаимным параметрам — представлена в виде расчета корней характеристического полинома. Их значения были следующие:

$$-50,032; -48,397; -41,454; -38,462; -33,333;$$

$$-25,641; -20,33 \pm j2,4703; -20,006; -20; -17,909;$$

$$-14,286; -10,988 \pm j1,1961; -10; -6,5291 \pm j5,1698;$$

$$-3,3732 \pm j13,549; -3,3333; -2,645; -2,577 \pm j1,2774;$$

$$-1; -0,86576 \pm j2,0879; -0,35471$$

Запас аperiodической устойчивости рассматриваемой системы определяется самым слабым вещественным корнем (в данном случае это $\alpha = -0,35471$ 1/с), а запас колебательной — вещественной частью ближайшего к границе устойчивости комплексного корня ($\alpha = -0,86576$ 1/с).

Эффект внедрения обратных связей по взаимным параметрам в АРВ генератора и синхронного двигателя, а также в АРЧМ генератора обосновывается на рис. 4 и 5. В частности, на рис. 4, а приведены кривые равного затухания в пространстве коэффициентов регулирования каналов по отклонению угла АРВ двигателя ($K_{\delta \text{АРВ СД}}$) и АРВ генератора ($K_{\delta \text{АРВ Г}}$). Постоянные времени указанных инерционных звеньев в первом приближении приняты равными 0,05 с.

Множество значений пар коэффициентов, не вызывающих сползания системы (нарушения аperiodической устойчивости), лежит левее и выше кривой, обозначенной на рис. 4, а как «граница аperiodической устойчивости» и практически не ограничивающей увеличение

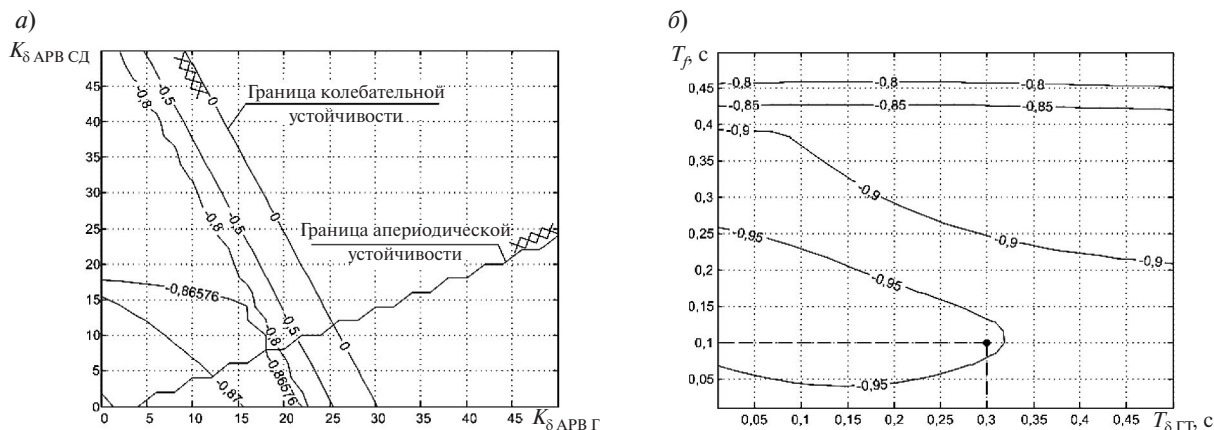


Рис. 4. Области колебательной и аperiodической устойчивости в плоскости настроек APB СГ и СД по взаимному углу (а), а также кривые равного затухания в плоскости постоянных времени $T_{\delta \text{ ГТ}}$ канала регулирования мощности турбины по отклонению угла и T_f системы подачи топлива (б)

коэффициентов. В то же время чрезмерное увеличение коэффициентов APB по взаимному углу может привести к возникновению самораскачивания. Этот эффект аналогичен использованию больших коэффициентов регулирования по отклонению напряжения при отсутствии стабилизации по частоте.

Анализ рис. 4, б показывает, что снижение значения постоянной времени системы подачи топлива T_f ведет к улучшению показателей колебательной устойчивости системы. Аperiodическая устойчивость при варьировании указанных постоянных времени в выбранном диапазоне существенным образом не меняется. В связи с вышесказанным и в соответствии с техническими возможностями выбрана $T_f = 0,1$ с. Тем не менее постоянная времени регулятора, имитирующая запаздывание при измерении, передаче, синхронизации и обработке сигнала, может варьироваться в достаточно широких пределах. Поэтому выдвигать специальные требования по повышению быстродействия указанных цепей нет необходимости. В дальнейших расчетах все постоянные времени рассматриваемых обратных связей были приняты равными 0,3 с.

Стоит отметить, что при выборе параметров регуляторов с точки зрения повышения статической устойчивости необходимо иметь в виду следующее соображение, которое касается дальнейшего рассмотрения вопросов динамической устойчивости. При трехфазных коротких замыканиях в жесткой системе, какой является ЭЭС месторождения, напряжения на шинах

и генератора, и двигателей падают практически до нуля, поэтому их системы возбуждения на достаточно значительный промежуток времени переходят в режим форсировки, увеличивая напряжение на соответствующих обмотках возбуждения в несколько раз. При этом значения выставленных настроек APB фактически не важны и проявляются только при постепенном переходе системы в режим малых возмущений в послеаварийной стадии процесса. Динамическая устойчивость системы определится главным образом управлением мощностью турбин генераторов электрической станции и частотными приводами двигателей. Причем целесообразно именно их *совместное* управление. В частности, выбор больших величин коэффициентов по взаимному углу регулятора мощности турбины оказывается неоправданным, поскольку может привести при тяжелых аварийных ситуациях практически к полной разгрузке турбины и последующему набору мощности, который будет сопровождаться значительными колебаниями всех параметров.

Для расширения области аperiodической устойчивости и повышения показателей демпфирования низкочастотных составляющих движения рассмотрим кривые равного затухания (рис. 5, а) в пространстве коэффициентов регулирования каналов APB генератора по отклонению угла ($K_{\delta \text{ APB Г}}$) и по производной напряжения ($K_{1u \text{ APB Г}}$). Несмотря на возможность более чем двухкратного (до $\alpha = -1,9$ 1/с) повышения уровня колебательной устойчивости, выберем более

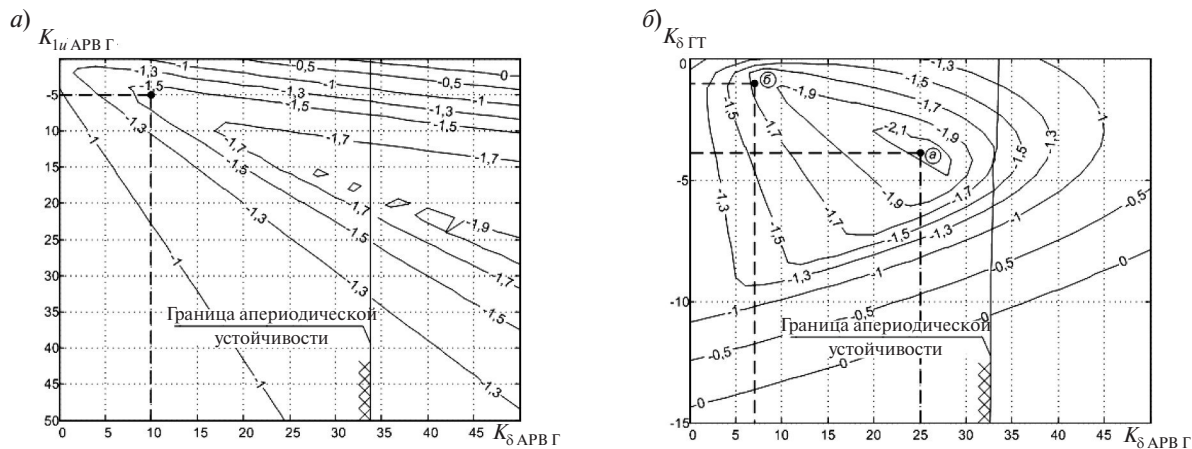


Рис. 5. Кривые равного затухания при дополнительном регулировании АРВ СГ по производной напряжения и взаимному углу (а) и при одновременном регулировании возбуждения и мощности по взаимному углу (б)

консервативную пару настроечных параметров ($K_{\delta_{АРВГ}} = 10$, $K_{1u_{АРВГ}} = -5$), что позволит не ухудшить также и показатели аperiodической устойчивости.

Построим области равного затухания (рис. 5, б) в пространстве следующих параметров: коэффициента усиления канала регулирования мощности турбины по отклонению угла ($K_{\delta_{ГТ}}$) и коэффициента усиления канала по отклонению угла АРВ генератора ($K_{\delta_{АРВГ}}$). Из рис. 5, б видно, что область колебательной устойчивости достаточно широка, и это позволяет в свете высказанных соображений сместить пару выбираемых параметров из точки «а» в точку «б».

Таким образом, при помощи метода D-разбиения и анализа построенных кривых равного затухания был произведен поэтапный выбор коэффициентов и постоянных времени дополнительных каналов регулирования. Эти параметры используются для дальнейших расчетов по оценке динамической устойчивости.

В конечном итоге ближайшие к границе устойчивости корни характеристического полинома системы с дополнительным регулированием АРВ и АРЧМ по взаимным параметрам приняли следующие значения:

$$\begin{aligned} & -10; -8,1607 \pm j7,3237; -7,3398; -4,468 \pm j0,87806; \\ & -3,4275 \pm j13,052; -3,3333; -2,01 \pm j3,3096; \\ & -1,7711 \pm j2,1542; -1; -0,53464 \end{aligned}$$

Отметим, что вещественная часть самой слабой комплексной пары корней по сравнению с исходной системой изменилась в $1,7711/0,86576 =$

$= 2,05$ раза, вещественный корень улучшился в $0,53464/0,35471 = 1,51$ раза.

Повышение уровня динамической устойчивости автономной ЭЭС посредством совместного регулирования АРЧМ газотурбинного агрегата и частотного привода синхронного двигателя

С помощью компьютерного моделирования были проанализированы переходные процессы при больших возмущениях, оценены предельные времена отключения коротких замыканий и предложены рекомендации по повышению динамической устойчивости автономных ЭЭС с преобладающей двигательной нагрузкой. В качестве аварийного возмущения было выбрано, как наиболее тяжелое, трехфазное КЗ на шинах станции.

На рис. 6 показана зависимость взаимного ускорения роторов синхронных машин от взаимного угла, полученная из расчета переходных процессов.

Предельное время существования короткого замыкания в указанных условиях составило 0,1047 с. Дальнейшее увеличение длительности КЗ приводит к потере устойчивости системы.

Предельная длительность короткого замыкания при значениях параметров, выбранных в результате оптимизации настроек каналов регулирования, осталась на прежнем уровне; при этом наблюдается почти полная разгрузка турбины, а длительность послеаварийного переходного процесса возрастает. В силу малой

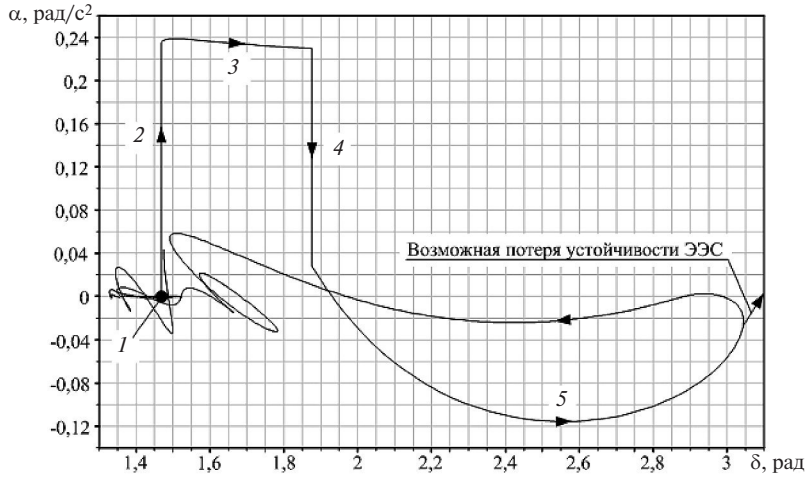


Рис. 6. Зависимости взаимного ускорения роторов синхронных машин от взаимного угла (1 — установившийся режим; 2 — включение шунта КЗ; 3 — ускорение ротора генератора относительно ротора двигателя; 4 — отключение шунта КЗ; 5 — послеаварийный переходный процесс)

эффективности использования АРВ во время короткого замыкания и непосредственно после него для повышения динамической устойчивости предлагается ввести дополнительное регулирование частотных приводов синхронных двигателей по углу.

Рассмотрим принципиальную схему частотно-регулируемого привода (рис. 7). Обычно в ней выделяют следующие основные части: диодный выпрямитель (В), автономный инвертор (АИН), систему управления (нижняя часть схемы, сигналы управления которой идут на АИН) и фильтр (дрессель и конденсатор). Синусоидальное напряжение сети с помощью выпрямителя преобразуется в пульсирующее (шестипульсное), близкое к постоянному. Фильтр сглаживает указанные пульсации. Далее посредством использования

широтно-импульсной модуляции из постоянного напряжения на входе АИН получаем двуполярный набор дискретных импульсов. Ширина импульсов моделируется по синусоидальному закону.

За счет изменения момента открытия IGBT-транзисторов, входящих в АИН, и длительности соответствующего воздействия можно добиться эффекта, при котором модуль напряжения на входе частотного преобразователя и на выходе совпадут, в то время как их фазы будут отличаться.

Оценим возможность введения изменения фазы напряжения на зажимах двигателя во время аварии. В данном случае управление частотным приводом подключается через 0,03 с — время, необходимое для срабатывания автоматики после возникновения короткого замыкания (момент времени $t = 10$ с). Фаза напряжения на зажимах

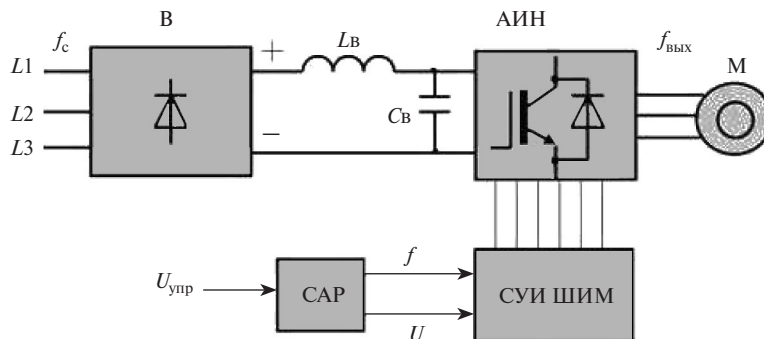


Рис. 7. Принципиальная схема частотно-регулируемого привода

синхронного двигателя меняется скачком на 2,1 рад, что соответствует величине выбега ротора синхронного двигателя во время короткого замыкания. Далее, через 0,03 с после исчезновения КЗ ступенчато меняем угол в сторону уменьшения на некоторое промежуточное значение, например 1,2 рад. Последним этапом данного опыта является полное отключение управления по показаниям режимных параметров.

На рис. 8 приведена зависимость взаимного ускорения синхронных машин от взаимного угла. Критерием отключения управления служит совпадение величин скольжений и, соответственно, частот синхронных генератора и двигателя.

Рассмотрим изменения во времени скольжений синхронных машин в течение одной секунды после возникновения короткого замыкания (рис. 9).

Управление частотно-регулируемым приводом значительно облегчает переходный процесс, причем влияние осуществляется не только на двигатель, но и — после отключения шунта КЗ (момент времени $t = 10,15$ с) — на генератор. Это позволяет увеличить уровень динамической устойчивости системы в $0,15/0,1047 \approx 1,5$ раза.

Проанализируем поведение синхронного двигателя. Изменение угла частотно-регулируемого привода (рис. 10) в момент времени $t = 10,03$ с позволяет не только замедлить торможение синхронного двигателя, но и немного его ускорить за счет превышения механического момента на валу двигателя электромагнитным. Отключение шунта короткого замыкания (в момент времени $t = 10,15$ с) приводит к такому же эффекту, что и первое переключение фазы, двигатель перестает тормозиться и начинает ускоряться (см. также рис. 9). Второе переключение угла (в момент времени $t = 10,18$ с) происходит после отключения шунта КЗ. Ступенчатое уменьшение фазы усиливает эффект, ускорение ротора двигателя увеличивается. Отключение управления (в момент времени $t = 10,47$ с) несколько ухудшает ситуацию, замедляя ротор двигателя. Тем не менее стоит отметить, что сохранение динамической устойчивости возможно только в случае, если отключение управления производится в течение отрезка времени, когда $s_D > s_G$; в ином случае сохранение динамической устойчивости не представляется возможным.

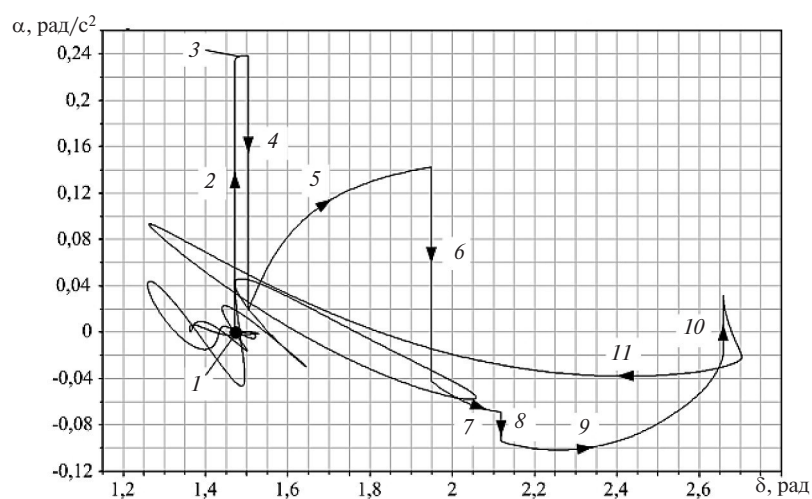


Рис. 8. Зависимость взаимного ускорения роторов синхронных машин от взаимного угла (1 — установившийся режим; 2 — включение шунта КЗ; 3 — ускорение синхронного генератора относительно синхронного двигателя; 4 — первое изменение фазы; 5 — продолжение ускорения генератора относительно двигателя; 6 — отключение шунта КЗ; 7 — начало послеаварийного переходного процесса; 8 — второе изменение фазы; 9 — продолжение послеаварийного переходного процесса; 10 — отключение управления частотно-регулируемым приводом; 11 — финальный этап послеаварийного переходного процесса)

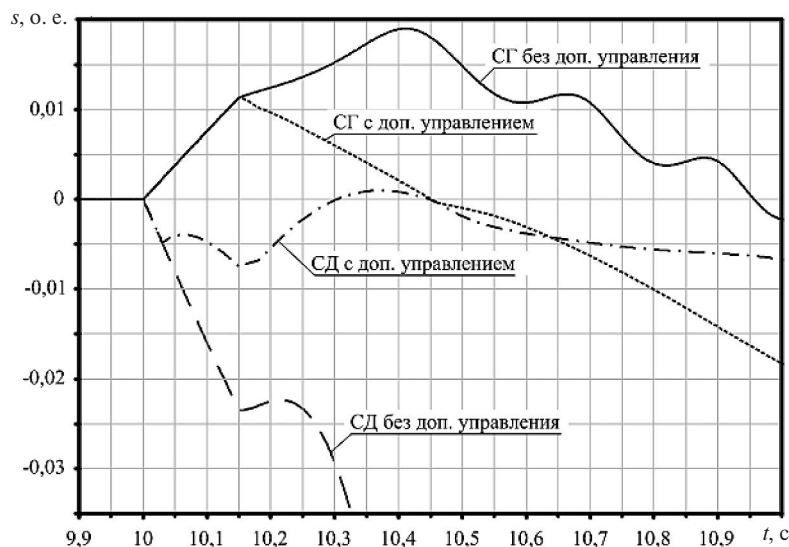


Рис. 9. Кривые скольжений синхронных машин

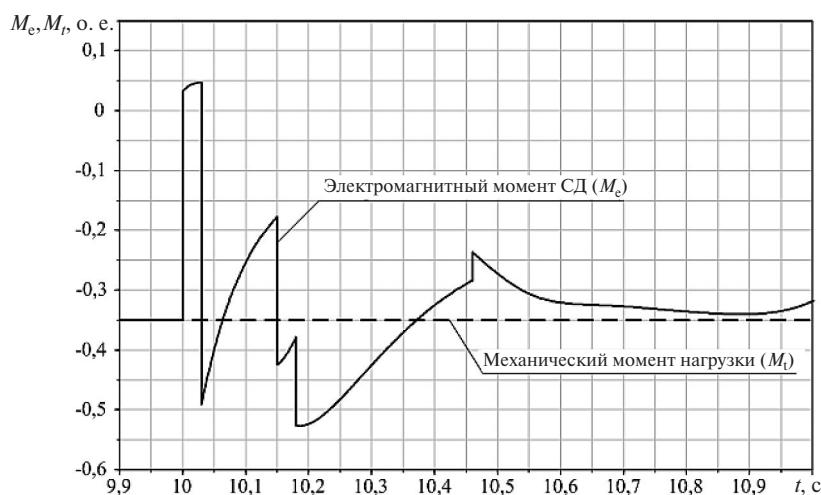


Рис. 10. Кривые моментов синхронного двигателя (реализация управления)

Выводы по работе

1. Внедрение дополнительного регулирования возбуждения и мощности по отклонению взаимного угла потенциально позволяет улучшить как апериодическую, так и колебательную статическую устойчивость.

2. Постоянные времени дополнительных обратных связей по углу в регуляторах возбуждения и мощности практически не оказывают влияния на статическую устойчивость системы. Поэтому увеличения быстродействия в каналах измерения, передачи и обработки сигнала взаимного угла не требуется.

3. Увеличение быстродействия канала подачи топлива газотурбинной установки практически не влияет на апериодическую, но улучшает колебательную статическую устойчивость системы. Это также позволяет компенсировать малый коэффициент в канале управления мощностью турбины, обусловленный нежелательностью сильной разгрузки турбины в ходе переходного процесса, вызванного короткими замыканиями.

4. Использование комплекса мероприятий по выбору и оптимизации параметров регуляторов, полученных на основе совместного расчета собственных значений матрицы переменных со-



стояния и областей D-разбиения, позволило улучшить апериодическую устойчивость исследуемой модели системы на 50 %, а колебательную более чем в 2 раза.

5. Выбранные оптимально с точки зрения статической устойчивости настройки дополнительных обратных связей по углу в регуляторах возбуждения не оказывают существенного влияния на уровень динамической устойчивости системы, так как в полной мере их действие проявляется только на конечной стадии переходного процесса, когда отключается форсировка возбуждения синхронных машин. До

этого момента положительный вклад вносит лишь регулирование мощности турбины.

6. В качестве мероприятия по повышению динамической устойчивости методами компьютерного моделирования обосновано дополнительное управление частотно-регулируемыми приводами синхронных двигателей по взаимному углу. Изменение фазы напряжения на зажимах двигателей в ходе вызванного КЗ переходного процесса совместно с регулированием мощности турбины генератора позволило увеличить предельную допустимую длительность короткого замыкания почти в 1,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андреюк В.А.** Использование абсолютного угла для управления переходными режимами энергосистемы // Известия НИИ постоянного тока. 2011. №65. С. 27–42.
2. **Сушко В.** Интеллект на защите энергосистем. Материалы международного съезда релейщиков // Новости электротехники. 2008. №6(48). С. 25–38.
3. **Shahraeini M., Javidi M.H.** Wide Area Measurement Systems. Advanced Topics in Measurements / Prof Zahurul Haq (Ed.), 400 p.
4. **Gavrilas M.** Recent Advances and Applications of Synchronized Phasor Measurements in Power Systems // Proceedings of the 9th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, Highvoltages, Electric Machines. P. 82–91.
5. **Жуков А., Куликов Ю., Демчук А., Мащевич И.** Система мониторинга переходных режимов // Электроэнергия. Передача и распределение. 2010. №2. С. 52–57.
6. **Аюев Б.** О системе мониторинга переходных режимов // Энергорынок. 2006. №2. С. 13–17.
7. **Burnett R.O. Jr., Butts M.M., Cease T.W., Centeno V., Michael G., Murphy R.J., Phadke A.G.** Synchronized phasor measurements of a power system event // IEEE Transaction on Power Systems. 1994. Vol. 9, No 3. P. 1643–1650.
8. **Беляев А.Н.** Повышение динамической устойчивости автономных энергосистем нефтегазодобывающих комплексов на основе электрического торможения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. №4(63). С. 163–169.
9. **Sharma C.** Modeling of an Island Grid // IEEE Transactions on Power Systems. 1998. Vol. 13, No. 3. P. 971–978.
10. **Беляев А.Н., Смоловик С.В.** Программирование на примере электротехнических и электроэнергетических задач: Учебное пособие. СПб.: Нестор, 2006. 120 с.
11. **Беляев А.Н., Смирнов А.А., Смоловик С.В.** Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей для оптимизации работы нефтеперекачивающих станций с газопоршневыми агрегатами соизмеримой мощности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2011. №1(117). С. 80–88.
12. **Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А.** Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
13. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. 3-е изд., исправл. М.: Наука, 1975. 768 с.
14. **Беляев А.Н. [и др.].** Переходные процессы в электроэнергетических системах: Учебное пособие. СПб, 2012. 156 с.

REFERENCES

1. **Andreyuk V.A.** Ispolzovaniye absolyutnogo ugla dlya upravleniya perekhodnymi rezhimami energosistemy [Application of absolute angle for voltage and frequency control in power system transients]. *Izvestiya NII postoyannogo toka*. 2011. №65. P. 27–42. (rus.)
2. **Sushko V.** Intellect na zashchite energosistem. Materialy mezhdunarodnogo syezda releyshchikov [Artificial intelligence for power system protection. Transactions of international congress of protection engineers]. *Novosti elektrotehniki*. 2008. №6(48). P. 25–38. (rus.)
3. **Shahraeini M., Javidi M.H.** Wide Area Measurement Systems. Advanced Topics in Measurements / Prof. Zahurul Haq (Ed.). 400 p.
4. **Gavrilas M.** Recent Advances and Applications of Synchronized Phasor Measurements in Power Systems. *Proceedings of the 9th wseas/iasme International Conference*

on electric power systems, highvoltages, electric machines. P. 82–91.

5. **Zhukov A., Kulikov Yu., Demchuk A., Matskevich I.** Sistema monitoringa perekhodnykh rezhimov [Wide area measurement system]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*. 2010. №2. P. 52–57. (rus.)

6. **Ayuuev B.** O sisteme monitoringa perekhodnykh rezhimov [On wide area measurement system]. *EnergoRynok*. 2006. №2. P. 13–17. (rus.)

7. **Burnett R.O. Jr., Butts M.M., Cease T.W., Centeno V., Michael G., Murphy R.J., Phadke A.G.** Synchronized phasor measurements of a power system event. *IEEE Transaction on Power Systems*, 1994. Vol. 9, No 3. P. 1643–1650.

8. **Belyaev A.N.** Povysheniye dinamicheskoy ustoychivosti avtonomnykh energosistem neftegazodobyvayushchikh kompleksov na osnove elektricheskogo tormozheniya. [Transient stability improvement of oil and gas production enterprises by application of electrical braking devices]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2008. №4(63). P. 163–169. (rus.)

9. **Sharma C.** Modeling of an Island Grid. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1998. Vol. 13, No. 3. P. 971–978.

10. **Belyaev A.N., Smolovik S.V.** Programirovaniye

na primere elektrotekhnicheskikh i elektroenergeticheskikh zadach: Uchebnoye posobiye. [Computer application in electrical and power engineering. Textbook]. SPb.: Nestor, 2006. 120 p. (rus.)

11. **Belyaev A.N., Smirnov A.A., Smolovik S.V.** Issledovaniye puskovykh rezhimov asinkhronnykh dvigateley dlya optimizatsii raboty nefteperekachivayushchikh stantsiy s gazoporshnevnyimi agregatami soizmerimoy moshchnosti [Analysis of induction motor direct and reduced-current starts for improving performance of oil pumping station with reciprocating gas engines]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*. 2011. №1(117). P. 80–88. (rus.)

12. **Gurevich Yu.Ye., Libova L.Ye., Okin A.A.** Raschety ustoychivosti i protivoavariynoy avtomatiki v energosistemakh [Calculations of stability and emergency control in power systems]. M.: Energoatomizdat, 1990. 390 p. (rus.)

13. **Besekerskiy V.A., Popov Ye.P.** Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control]. 3-ye izd., ispravl. M.: Nauka, 1975. 768 p. (rus.)

14. **Belyaev A.N. [i dr.].** Perekhodnyye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh: Uchebnoye posobiye [Transients in electrical power systems. Textbook]. SPb., 2012. 156 p. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

СТОГОВ Алексей Юрьевич — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: a.u.stogov@gmail.com

AUTHORS

BELYAEV Andrey N. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

STOGOV Aleksei Yu. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: a.u.stogov@gmail.com