



ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЗАИМНЫМ ПАРАМЕТРАМ

А.Ю. Стогов, А.Н. Беляев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
г. Санкт-Петербург, Россия
andreybelyaev@yandex.ru

Резюме: В работе проведено исследование координированного управления мощностью генерации и нагрузки для повышения уровня динамической устойчивости автономной электроэнергетической системы (ЭЭС) нефтедобывающего комплекса с преобладающей двигательной нагрузкой. Показано, что использование дополнительного управления позволяет повысить показатели динамической устойчивости более чем на 40%. Проведена совместная координация настроечных параметров устройств АРВ и АРЧМ синхронных машин. На основании анализа статической устойчивости подтверждено положительное влияние настроек АРВ на переходные процессы в послеаварийном режиме.

Ключевые слова: автономная энергосистема, динамическая устойчивость, газотурбинный агрегат, синхронный генератор, синхронный двигатель, асинхронный двигатель, автоматический регулятор возбуждения, автоматический регулятор частоты и мощности, система мониторинга переходных режимов, частотно-регулируемый привод

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-55-66.

Для цитирования: Стогов А.Ю., Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автономной энергосистемы на основе управления по взаимным параметрам // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 55-66. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-55-66.

IMPROVEMENT OF TRANSIENT STABILITY OF AUTONOMOUS POWER SYSTEM ON BASIS OF WIDE AREA CONTROL SYSTEM

A.Yu.Stogov, A.N.Belyaev

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russia
andreybelyaev@yandex.ru

Abstract: The coordinated generation and load control to increase transient stability level of oil-production enterprise autonomous power system with dominant motor load is studied in the paper. Mutual angle between voltage phasors at gas turbine plant bus and equivalent load node as well as slip difference of synchronous machines are used as input signals. It is shown that implementation of additional control allows to increase the level of transient stability by more than 40%. The combined coordination of power system stabilizer of synchronous generators and motors as well as gas turbine frequency control parameters is applied. The positive impact of power system stabilizer settings on post-accident conditions is proved by analysis of small signal stability.

Keywords: autonomous power system, transient stability, gas turbine, synchronous generator, induction motor, automatic voltage regulator, power system stabilizer, automatic load-frequency control, wide area measurement system, variable frequency drive

For citation: A.Yu. Stogov, A.N. Belyaev. Improvement of transient stability of autonomous power system on basis of wide area control system. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2019*. vol. 21. № 1-2. pp.55-66. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-55-66.

Введение

Возможность использования взаимных углов между векторами напряжений на шинах станций для целей вторичного регулирования была озвучена более полувека назад, но не получила распространения по причине отсутствия соответствующих технических средств. Первая передача вектора напряжения противоположного конца ЛЭП по телеканалам или его моделирование в СССР датируется 80-ми годами двадцатого века.

Появление и использование спутниковой системы GPS дало толчок в развитии идеи использования взаимного угла для нужд WAMS (от англ. *wide area measurement system* – глобальная система измерений) [1].

На сегодняшний день, технология WAMS/СМПП (система мониторинга переходных режимов) получила широкое распространение в энергетике многих стран мира [2]. Она активно внедряется в «большую» энергетику, вместе с тем обладает значительным потенциалом и в автономных энергосистемах нефтегазодобывающих комплексов, обладающих рядом специфических особенностей, таких как преобладание двигательной нагрузки, применение высокоманевренных газотурбинных и газопоршневых агрегатов, и, как следствие, характеризующихся низким уровнем динамической устойчивости [3, 4].

Работа насосных, компрессорных и других механизмов на месторождении происходит в условиях, не соответствующих оптимальным для работы асинхронного двигателя. Для погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН) характерна высокая подача, приблизительно от 20 000 баррелей в сутки на глубине 1200 метров и до 5000 баррелей в сутки на глубине 3000 метров, причем этот показатель зависит от множества факторов. Однако существуют и ступени с низкой подачей (приблизительно 100 баррелей в сутки). Кроме того, любое изменение режима работы, а также требуемое повышение экономичности асинхронного двигателя требует сложного управления, а при таком большом ресурсе двигателя достичь оптимальных рабочих характеристик насоса, компрессора и прочих электродвигательных установок можно только с помощью частотного преобразователя.

Частотно-регулируемый привод (ЧРП) кроме своих неоспоримых плюсов характеризуется повышенным потреблением реактивной мощности, особенно в режимах, далеких от номинальных (включение двигателя или малая нагрузка). Любая силовая электроника является источником гармонических составляющих, ее применение может привести к появлению вибраций генерирующего оборудования ГТУ на частотах крутильных колебаний [5].

Целью работы является повышение динамической устойчивости автономной системы на основе координированного управления АРЧМ генераторов газотурбинной электростанции и ЧРП мощной синхронной нагрузки по взаимным параметрам.

При этом решаются следующие основные задачи:

- оценка влияния дополнительных каналов при управлении частотно-регулируемым приводом синхронного двигателя (СД) и АРЧМ синхронного генератора;
- разработка методики оптимизации дополнительных параметров на основании использования функции минимизации;

–повышение уровня статической устойчивости системы на основе применения метода сдвига собственных значений.

1. Моделирование автономной ЭЭС с преобладающей двигательной нагрузкой

В ходе работы была рассмотрена статическая и динамическая устойчивость автономной электроэнергетической системы (рис. 1), состоящей из газотурбинной электростанции, линии электропередачи и эквивалентного узла нагрузки [6].

Описание переходных процессов в синхронном генераторе (СГ) и двигателе выполнено на основании системы уравнений Парка-Горева в относительных единицах взаимного типа [7] без учета влияния быстропереходных процессов в статорных контурах. В качестве дополнительных в моделях АРВ и АРЧМ используются обратные связи по разности углов между векторами напряжения на линии.

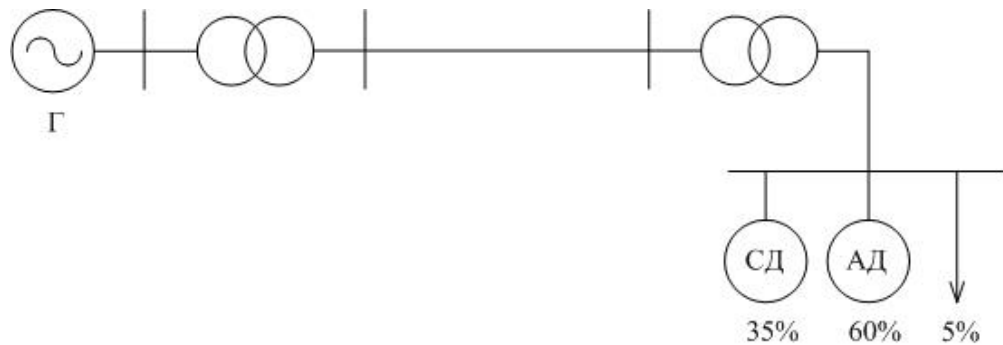


Рис. 1. Расчетная схема автономной электроэнергетической системы

Моделирование газотурбинного агрегата (ГТА) было произведено на основе упрощенной математической модели [6]. Одно из наиболее существенных отличий от классически применяемых аналогов – использование дополнительного канала по разнице углов векторов напряжения линии.

В данной работе используется модель двухклеточного асинхронного двигателя [8]. В целом его математическая модель аналогична модели синхронного двигателя, за исключением отсутствия уравнений обмотки возбуждения и автоматического регулятора возбуждения [6].

В большинстве случаев двигатели автономных энергосистем, за исключением маломощных, комплектуются средствами, облегчающими пуск. Для асинхронных двигателей – это переключение обмоток звезда/треугольник, использование пусковых реостатов и частотный пуск.

Для синхронных двигателей преимущественно применяют устройства плавного пуска, в основе которых лежит управление импульсами напряжения, подаваемыми на первичную обмотку двигателя.

В частотно-регулируемом приводе выделяют следующие основные части: диодный выпрямитель, автономный инвертор (АИН), систему управления и фильтр. 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.

В рамках данной работы будет оценена эффективность изменения фазы напряжения на зажимах двигателя во время аварии в зависимости от угла на линии. Влияние на фазу напряжения на зажимах синхронного двигателя будет производиться посредством использования двух апериодических звеньев первого порядка, включенных параллельно. Входными сигналами для них будут являться разность скольжений синхронного генератора и синхронного двигателя, а также разность фаз напряжения на линии.

2. Методика совместной оптимизации систем регулирования для повышения статической и динамической устойчивости

2.1. Повышение статической устойчивости на основе применения методов *D*-разбиения и сдвига собственных значений

Статическая устойчивость системы исследовалась на основе компьютерного моделирования в программном комплексе *Matlab* с помощью методов *D*-разбиения и сдвига собственных значений матрицы переменных состояния [9]. Метод *D*-разбиения позволяет выделять области устойчивости в координатах выбранных параметров. Варьирование исследуемых параметров системы приводит к движению корней характеристического полинома по комплексной плоскости. Суть метода сводится к поиску такого набора значений, при которых все вещественные корни, а также действительные части комплексных корней лежат в левой полуплоскости, что соответствует условию статической устойчивости системы.

Обычно метод направлен на поиск именно границы устойчивости. Для этого в характеристическом полиноме линеаризованной модели системы $D(p)=0$ оператор p заменяют на $j\omega$, тем самым получая уравнение $D(j\omega)=0$, считая вещественную часть корней равной нулю. Для каждого значения ω_k можно найти такое сочетание искомых параметров, которое обращает левую часть уравнения в нуль. Эти значения образуют точку, лежащую на границе устойчивости. Каждой точке границы соответствует определенное значение $j\omega_k$, являющееся корнем соответствующего характеристического уравнения.

В отличие от классической трактовки, в ходе данной работы использовался метод аналогичный описанному выше с той лишь разницей, что при варьировании исследуемых параметров на основании компьютерных расчетов строились не только границы устойчивости, но и линии равного затухания (рис. 2), соответствующие значению вещественной части самого правого из корней характеристического многочлена.

Как видно из рис. 2, введение управления по взаимным параметрам имеет значительный потенциал для увеличения статической устойчивости.

Метод сдвига собственных значений позволяет определять общую настройку регуляторов, обеспечивающую устойчивость системы в целом и приемлемое демпфирование колебаний.

В качестве основного метода рассматривался сдвиг правых корней вглубь отрицательной полуплоскости путем минимизации значения функции качества [10]. Данная процедура проводилась с использованием программного комплекса *Matlab* при помощи соответствующих функций минимизации, в частности *fmincon*.

В качестве функции оптимизации использовалась функция вида:

$$F = \sum_{\alpha_i \leq \alpha_0} (\alpha_0 - \alpha_i)^2,$$

где α_0 – заданная величина показателя качества; α_i – вещественные части корней, взятые с обратным знаком.

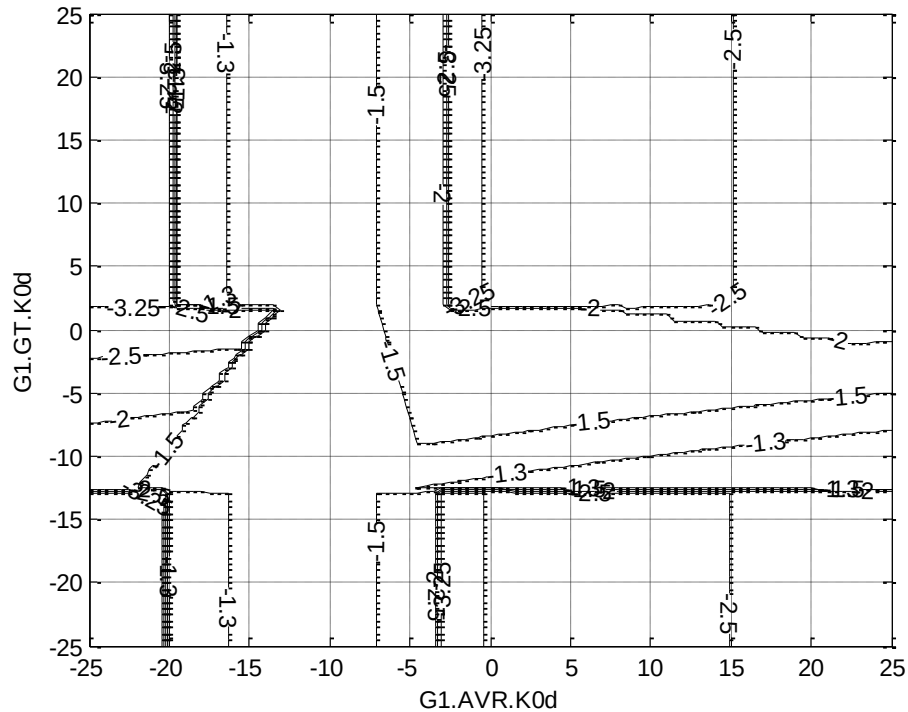


Рис. 2. Линии равного затухания в пространстве коэффициентов каналов по отклонению угла в АРВ генератора и АРЧМ турбины

Величина α_0 отражает требования, предъявляемые к уровню демпфирования колебаний в системе. Если в процессе численного поиска удастся обеспечить $\alpha_i \geq \alpha_0$ для всех корней, т.е. $F=0$, то координация настроек либо прекращается, либо продолжается в направлении достижения большего α_0 [9].

Функция качества должна удовлетворять двум обязательным условиям:

- зависеть от группы собственных чисел матрицы, определяющих демпферные свойства системы;
- должна быть достаточно гладкой, т.е. иметь непрерывные производные по варьируемым параметрам.

При заданном α_0 функция F зависит только от корней 1–4 (рис.3), лежащих правее пунктирной прямой. Данные корни называют доминирующими. Вклад каждого из доминирующих корней в функцию F тем больше, чем дальше от этой прямой он расположен. Вместе с тем, значение F определяется всей группой доминирующих корней. С этой точки зрения корни 5–6 не участвуют в формировании F до тех пор, пока при варьировании коэффициентов стабилизации они не пересекут пунктирную прямую.

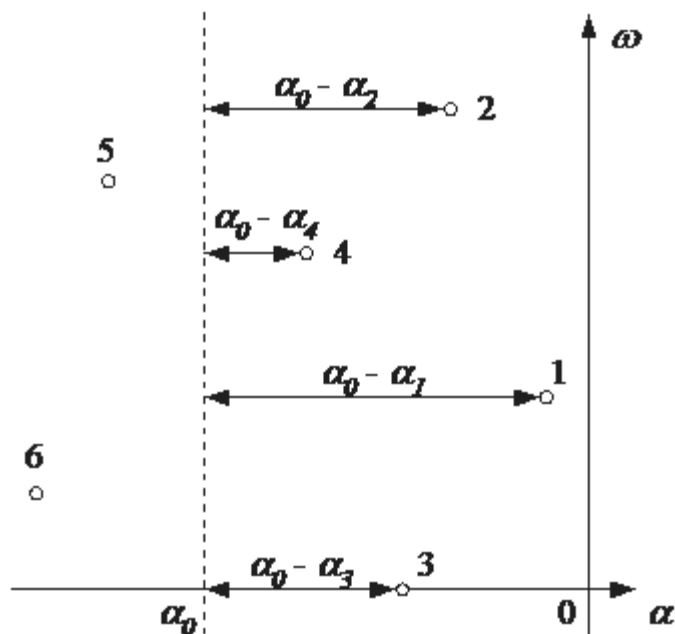


Рис. 3. Схема формирования функции качества

2.2. Повышение динамической устойчивости системы на основе расширенного правила площадей

Правило равновеликих площадей для синхронной машины, работающей на сеть, в классическом его понимании, описывается формулой

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (M_T - M_e) d\delta = \int_{\delta_m}^{\delta_1} (M_T - M_e) d\delta,$$

где δ – угол нагрузки; δ_0 – угол в исходном установившемся режиме, при котором электрическая и механическая мощности машины имеют одинаковую величину; δ_1 – угол, соответствующий изменению знака разности электрической и механической мощностей машины; δ_m – максимальный угол, при котором перемещение ротора машины относительно магнитного поля прекращается; M_T – вращающий момент (момент турбины); M_e – тормозящий момент (электромагнитный момент).

Правило, описываемое приведенным выше выражением, означает, что после внезапного изменения нагрузки синхронной машины система останется устойчивой, если площадь кривой динамической характеристики, соответствующая работе сил торможения, по меньшей мере, равна площади работы сил ускорения. Если площадь, соответствующая работе сил торможения, меньше площади работы сил ускорения, то машина выпадет из синхронизма.

Дифференциальное уравнение движения для системы двух совместно работающих машин ограниченной мощности принципиально не отличается от уравнения, описывающего работу машины на сеть:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e.$$

Результирующее значение

$$T_J = \frac{T_{J_Г} \cdot T_{J_СД}}{T_{J_Г} + T_{J_СД}}.$$

Результирующая эквивалентная электрическая мощность

$$P_e = \frac{P_{e_Г} T_{J_СД} - P_{e_СД} T_{J_Г}}{T_{J_Г} + T_{J_СД}}.$$

Результирующая эквивалентная механическая мощность (на валу)

$$P_m = \frac{P_{m_Г} T_{J_СД} - P_{m_СД} T_{J_Г}}{T_{J_Г} + T_{J_СД}}.$$

Это означает, что небаланс моментов пропорционален второй производной угла, – как следствие, систему можно считать устойчивой при приложении конечного возмущения, если выполняется следующее равенство:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} \frac{d^2\delta}{dt^2} d\delta = \int_{\delta_m}^{\delta_1} \frac{d^2\delta}{dt^2} d\delta.$$

Иными словами, должно выполняться равенство, в левой части которого находится величина, соответствующая площадке ускорения, а в правой – площадке торможения.

Построение кривых в координатах $\frac{d^2\delta}{dt^2}$ и δ производилось в программных пакетах *Dymola* и

Matlab. Критерием оптимизации параметров систем регулирования АРЧМ ГТА, ЧРП СД и АРВ СГ и СД с точки зрения динамической устойчивости была выбрана минимизация величины площадки ускорения. Данный выбор был обусловлен относительной простотой определения указанной величины.

На рис. 4 показана зависимость взаимного ускорения роторов синхронных машин от взаимного угла, полученная из кривых переходных процессов до введения дополнительного управления (синий цвет) и после (красный цвет).

Как видно из рис. 4, при введении дополнительного управления значительно изменяется наклон зависимости на участке, соответствующем протеканию короткого замыкания – уменьшается взаимное ускорение роторов синхронных машин во время короткого замыкания, что приводит к уменьшению площадки ускорения. За счет этого достигается возможность увеличения предельного времени отключения короткого замыкания.

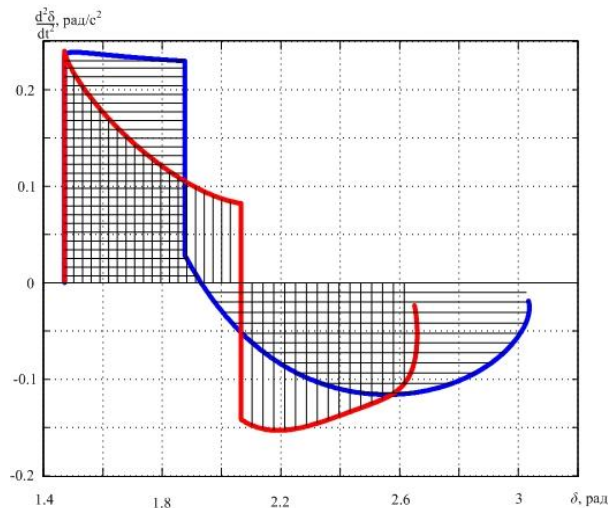


Рис. 4. Зависимость взаимного ускорения роторов синхронных машин от взаимного угла

Рис. 5 наглядно показывает существенное снижение разности моментов на валах генератора и синхронного двигателя в аварийном и послеаварийном режимах вследствие внедрения дополнительного управления по взаимным параметрам.

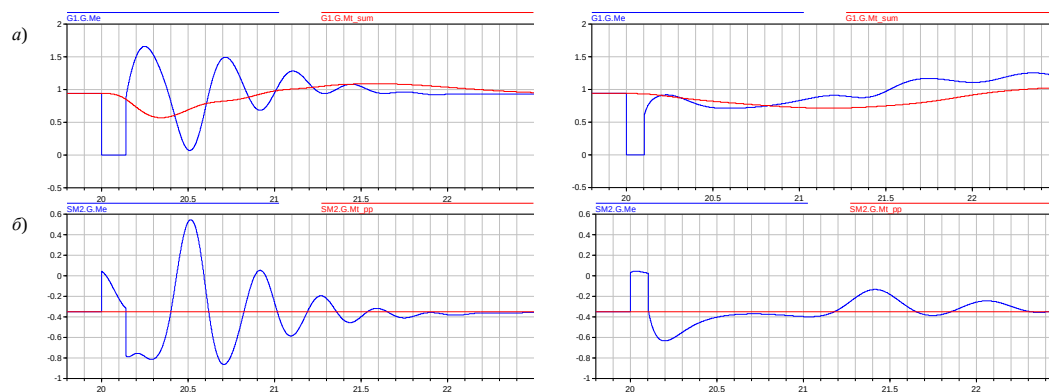


Рис. 5. Кривые зависимостей моментов генератора (а) и синхронного двигателя (б) до и после введения дополнительного управления по взаимному углу

Поскольку оптимальные с точки зрения статической устойчивости настройки регуляторов не всегда соответствуют динамически устойчивой системе или могут соответствовать достаточно низким предельным временам отключения короткого замыкания в системе, было принято решение об использовании функции качества, совмещающей в себе оценку отклонения крайних правых корней относительно заданного показателя качества α_0 и аналогичную оценку отклонения величины площадки ускорения от некоего заданного значения. Общий смысл данной функции описывается следующим выражением:

$$F = \sum_{\alpha_i \leq \alpha_0} (\alpha_0 - \alpha_i)^2 + k \cdot A_{\text{уск}},$$

где $A_{\text{уск}}$ – величина площадки ускорения, k – весовой коэффициент, величина которого подбиралась эмпирическим путем. В рамках данной работы рассматривалось два варианта соотношений: примерное равенство первого и второго слагаемого, то есть одинаковый вклад показателей статической и динамической устойчивости в функцию качества, и случай, когда второе слагаемое формулы превосходило первое минимум на порядок. В этом случае основной акцент делался на динамическую устойчивость системы.

3. Результаты совместной координации систем регулирования по взаимным параметрам

В качестве основного критерия для оценки динамической устойчивости электроэнергетической системы в рамках данной работы рассмотрено предельное время отключения трехфазного короткого замыкания на шинах станции. Данный вид аварийного возмущения был выбран по причине его наибольшей тяжести с точки зрения сохранения динамической устойчивости системы.

С помощью языка моделирования динамических систем *Modelica* было выполнено моделирование и анализ переходных процессов при конечных возмущениях, а также оценены предельные времена отключения коротких замыканий в автономной ЭЭС с преобладающей двигательной нагрузкой. Методика минимизации площади ускорения позволила выбрать следующие параметры: коэффициент канала по отклонению угла на линии АРВ генератора $K_{\delta_АРВ_Г} = 1$, коэффициент в канале по отклонению угла на линии регулятора мощности турбины $K_{\delta_ГТ} = -1$, постоянная времени звена, моделирующего систему подачи топлива $T_f = 0,1$ с.

Данные настройки, как это показано в таблице ниже, позволили при неизменном уровне апериодической устойчивости улучшить колебательную устойчивость в 1,6039/0,86576≈1,85 раза.

Таблица

Увеличение статической устойчивости при внедрении регулирования по взаимным параметрам

Система без регулирования	При дополнительном управлении
-10.0000	-10.0000
-6.5935 ± 4.8650i	-9.3328 ± 4.6657i
-3.3565 ± 13.6942i	-9.2931 ± 1.1143i
-3.3333	-4.1303
-2.5887 ± 1.0476i	-3.4561 ± 20.2978i
-2.5831	-3.3333
-1.0000	-2.9931 ± 1.2174i
-0.8607 ± 2.0855i	-2.4161 ± 2.5531i
-0.3572	-1.6039 ± 0.2347i
	-1.0000
	-0.3925

Для улучшения уровня напряжения в послеаварийном переходном процессе дополнительно было введено управление по первой производной напряжения и определены коэффициенты по отклонению напряжения в синхронном генераторе и двигателе: $K_{1u_APB_Г} = -1$; $K_{1u_APB_СД} = -2$; $K_{0u_APB_Г} = -10$; $K_{0u_APB_СД} = -20$.

Предельное время отключения короткого замыкания в системе без дополнительного управления по взаимным параметрам составило 0,1047 с. Дальнейшее увеличение длительности КЗ приводит к потере устойчивости системы.

Управление частотно-регулируемым приводом, которым оснащен синхронный двигатель, осуществляется с использованием входных сигналов разности скольжений синхронных машин и разности фаз векторов напряжения на линии. Данное мероприятие реализовано посредством внедрения апериодических звеньев, сигнал на выходе которых подается в канал управления фазой напряжения.

При этом облегчается переходный процесс, причем влияние осуществляется не только на двигатель, но и, после отключения шунта КЗ, на генератор. Это позволяет увеличить уровень динамической устойчивости системы в 0,1488/0,1047≈1,42 раза.

Также следует отметить, как это видно из рис.6, угол между векторами напряжения на линии в момент аварии меняется скачком, что позволяет выдавать более эффективное управляющее воздействие.

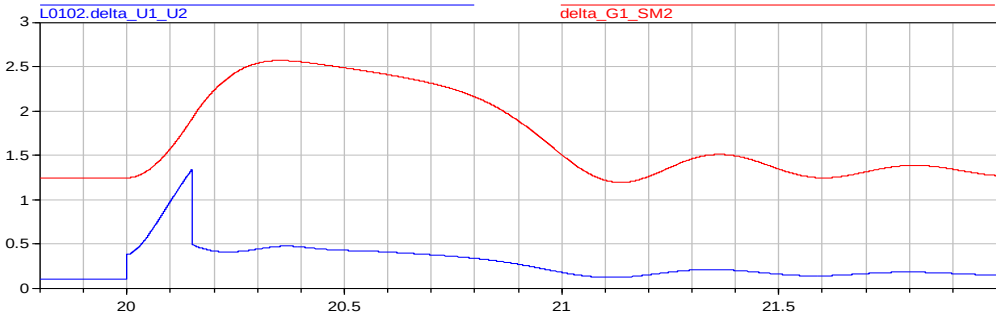


Рис. 6. Кривые взаимных углов между векторами напряжения на линии (синий) и между роторами синхронного генератора и двигателя (красный)

На рис. 7 показаны графики изменения напряжений в двух характерных точках энергосистемы: на шинах газотурбинной электростанции и эквивалентного узла нагрузки.

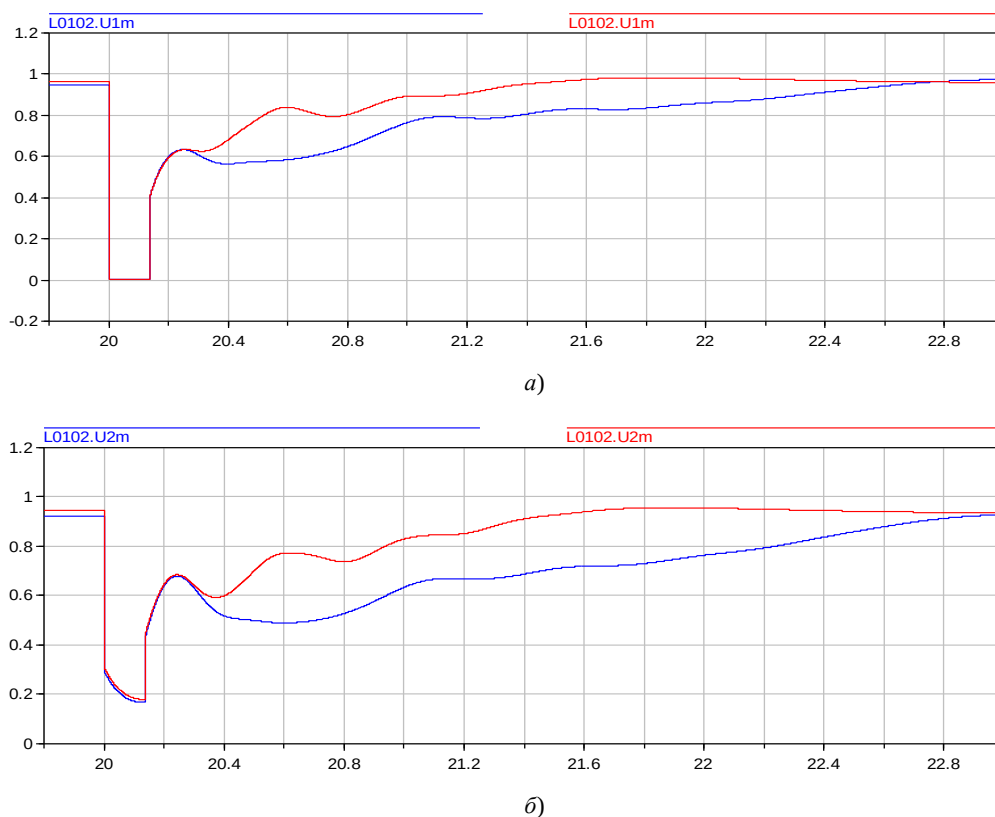


Рис. 7. Кривые напряжений до введения дополнительного управления по напряжению (синего цвета) и после (красного) на шинах станции (а) и нагрузки (б)

Синие графики соответствуют предельному времени отключения короткого замыкания в системе при стандартных коэффициентах каналов по отклонению напряжения в АРВ синхронных машин. Красные графики показывают улучшение уровня напряжения в послеаварийном переходном процессе при увеличении коэффициентов в каналах по отклонению напряжения и его производной.

Выводы

1. В качестве мероприятия по повышению динамической устойчивости на основе методов компьютерного моделирования обосновано совместное координированное управление АРЧМ и ЧРП. Изменение фазы напряжения на зажимах двигателей в ходе вызванного КЗ переходного процесса, совместно с регулированием мощности турбины генератора, позволило увеличить предельную длительность короткого замыкания практически на 50 %.

2. Комплексная оценка статической и динамической устойчивости позволила увеличить также и колебательную устойчивость системы в 1,85 раза.

3. Разработана методика совместной оптимизации показателей статической и динамической устойчивости.

Литература

1. Андреюк В.А. Использование абсолютного угла для управления переходными режимами энергосистемы // Известия НИИ постоянного тока. 2011. № 65. С. 27–42.

2. Terzija V., Valverde G, Cai D., Regulski P., Madani V., Fitch J., Skok S., Begovic M.M., Phadke A. Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Network // Proceedings of the IEEE. 2011. Vol. 99, No 1. P. 80–93. DOI 10.1109/JPROC.2010.2060450.
3. Куликов Ю.А. Технология векторной регистрации параметров и ее применение для управления режимами ЕЭС России // Электро. 2011. №2. С. 2–5.
4. Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автономных энергосистем нефтегазодобывающих комплексов на основе электрического торможения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. №4(63): Основной выпуск. С. 163–169.
5. Беляев А.Н., Смоловик С.В. Подавление слабодемпфированных крутильных колебаний в автономных энергосистемах // Электрические станции. 2017. № 12. С. 26–33.
6. Стогов А.Ю., Беляев А.Н.. Повышение динамической устойчивости автономных энергосистем на основе данных мониторинга переходных режимов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. №1(214). С. 48–58.
7. Anderson P.M., Agarwal B.L., Van Ness J.E.. Subsynchronous Resonance in Power Systems, IEEE Press, New York, 1990. 270 pp.
8. 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.
9. Устинов С.М. Метод численного поиска настроек регуляторов для обеспечения устойчивости больших энергообъединений // Известия академии наук. Энергетика. 2015. №2. С. 49–56.
10. Груздев И.А., Масленников В.А., Устинов С.М. Разработка методов и программного обеспечения для анализа статической устойчивости и демпферных свойств больших энергосистем // Методы и программное обеспечение для расчетов колебательной устойчивости энергосистем (ФЭО). СПб, 1992. С. 66–88.

Авторы публикации

Стогов Алексей Юрьевич – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

Беляев Андрей Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

References

1. Andreyuk V.A. Ispolzovaniye absolutnogo ugla dlya upravleniya perekhodnymi rezhimami energosistemy [Application of absolute angle for voltage and frequency control in power system transients] // Izvestiya NII postoyannogo toka [Transactions of High Voltage Direct Current Power Transmission Research Institute]. 2011. № 65. pp. 27–42. (rus)
2. Terzija V., Valverde G, Cai D., Regulski P., Madani V., Fitch J., Skok S., Begovic M.M., Phadke A. Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Network // Proceedings of the IEEE. 2011. Vol. 99, No 1. P. 80–93. DOI 10.1109/JPROC.2010.2060450.
3. Kulikov Yu.A. Tekhnologiya vektornoy registratsii parametrov i yeyo primeneniye dlya upravleniya rezhimami EES Rossii [The technology of vector data registration and using it to control of Russian power system modes] // Elektro. 2011. № 2. P. 2–5. (rus).
4. 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 [St-Petersburg State Polytechnical University Journal]. 2008. № 4(63): Osnovnoy vypusk. P. 163–169. (rus).

5. Belyaev A.N., Smolovik S.V. Podavleniye slabodempfirovannykh krutilnykh kolebaniy v avtonomnykh energosistemakh. [Reduction of weakly-damped thrash in autonomous power systems] // Elektricheskiye stancii [Electrical stations]. № 12. 2017. P. 26–33. (rus).

6. Stogov A.Yu., Belyaev A.N. Povysheniye dinamicheskoy ustoychivosti avtonomnykh energosistem na osnove dannykh monitoringa perekhodnykh rezhimov [Improvement of transient stability of autonomous power systems by using of wide area measurement system data] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU [St-Petersburg State Polytechnical University Journal]. 2015. № 1(214). P. 48–58. (rus).

7. Anderson P.M., Agarwal B.L., Van Ness J.E.. Subsynchronous Resonance in Power Systems, IEEE Press, New York, 1990. 270 pp.

8. Belyaev A.N., Smirnov A.A., Smolovik S.V. Issledovaniye puskovykh rezhimov asinkhronnykh dvigateley dlya optimizatsii raboty nefteperekacivayushchikh stanciy s gazoporshnevymi agregatami soizmerimoy moschnosti [Research of starting modes of asynchronous motors to work optimization of oil-gas stations with equivalent units] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye [St-Petersburg State Polytechnical University Journal]. 2011. № 1(117). P. 80–88. (rus).

9. Ustinov S.M. Metod chislennogo poiska nastroeek regulyatorov dlya obespecheniya ustoychivosti bolshikh energoobedineniy [Method of numerical search of regulators' settings to large power associations stability procuring] // Izvestiya akademii nauk. Energetika [Academy of Sciences journal]. 2015. № 2. P. 49–56.

10. Gruzdev I.A., Maslennikov V.A., Ustinov S.M. Razrabotka metodov i programmnogo obespecheniya dlya analiza staticheskoy ustoychivosti i dempfnykh svoystv bolshikh energosistem [Design of methodes and soft for small signal stability and damping quality of large power systems analysis]. // Metody i programmnoe obespechenie dlya raschetov kolebatelnoy ustoychivosti sistemy [Methodes and soft for oscillatory stability of power systems calculating]. SPb, 1992. P. 66–88. (rus).

Authors of the publication

Aleksey Yu. Stogov -. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russia.

Andrey N. Belyaev - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russia.

Поступила в редакцию

19 августа 2018 г.