

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ  
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ  
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ  
НА КАЧЕСТВО ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Асп. ФИЛИПЧИК Ю. Д.

*Белорусский национальный технический университет*

Современная электроэнергетическая система представляет собой сложную структуру с постоянно изменяющимися параметрами режима (напряжение, мощность потребления и генерации в узлах схемы сети). Отклонение напряжения у потребителей относительно номинального значения (в сторону увеличения или уменьшения) приводит к ухудшению условий работы или сокращению срока службы оборудования, снижению производительности технологических механизмов, браку продукции и т. д. В связи с этим необходимость регулирования напряжения в энергосистеме определяется как энергосистемой, так и потребителями. Также системные требования к уровню напряжения в сетях высшего напряжения диктуются и устойчивостью энергосистем [1].

Устройства регулирования напряжения на выводах генераторов электрических станций должны поддерживать заданный уровень напряжения и требуемое распределение реактивной мощности между параллельно работающими синхронными машинами. Различают регулятор напряжения и регулятор возбуждения. Регулятор напряжения представляет собой устройство, предназначенное для поддержания напряжения на заданном уровне. В случаях, когда дополнительно необходимо обеспечить регулирование возбуждения для повышения устойчивости параллельной работы энергосистем, повышения четкости действия релейной защиты, обеспечения самозапуска двигателей и т. п., применяются автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) [2].

При коротких замыканиях (КЗ) и других аварийных режимах, связанных со значительным понижением напряжения, АРВ быстро и значительно увеличивает (форсирует) ток возбуждения и тем самым изменяет ЭДС и напряжение на шинах генератора. В режимах, связанных с повышением напряжения на шинах электрической станции, АРВ быстро снижает ЭДС генератора, выполняя тем самым процесс расфорсировки. Применение автоматического регулирования возбуждения синхронной машины также позволяет увеличить предельное время отключения короткого замыкания [3].

В качестве параметров, по которым выполняется регулирование, используется отклонение напряжения, тока, активной и реактивной мощности, угла  $\delta$  сдвига вектора электродвижущей силы генератора  $\underline{E}$  относительно вектора напряжения  $\underline{U}_{\text{бy}}$  балансирующего узла. Повышение эффективности регулирования возбуждения может быть достигнуто за счет ввода в регулируемую функцию АРВ сигналов, пропорциональных пер-

вой и второй производным некоторых параметров. Это позволяет добиться повышения предела выдаваемой мощности по статической и динамической устойчивости, а также демпфирования колебаний в переходных процессах [4]. В системах АРВ совместно или же вместо угла  $\delta$  вводится сигнал по отклонению частоты – скольжению  $\Delta f = s = \frac{d\delta}{dt}$  или ускорению

$\alpha = \frac{d\Delta f}{dt} = \frac{ds}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2}$ . В этих случаях к системе АРВ предъявляют следующие требования [2]:

- наличие высокого коэффициента усиления системы АРВ в разомкнутом состоянии (в пределах до  $K_U = 50$  ед. возб./ед. ст. напр.);
- регулирование возбуждения должно выполняться не только в функции угла  $\delta$  или других параметров, адекватных углу, но и в функции напряжения генератора;
- использование при высоком коэффициенте усиления всех средств стабилизации, включая обратные связи.

Для улучшения качества переходных процессов в АРВ необходимо выполнять коррекцию сигнала по возмущению, а также воздействие по производной регулируемых величин. Один из возможных алгоритмов управления током возбуждения в зависимости от изменения скольжения и ускорения ротора генератора представлен на рис. 1 [5]. Суть способа поясним с использованием угловых характеристик активной мощности генератора.

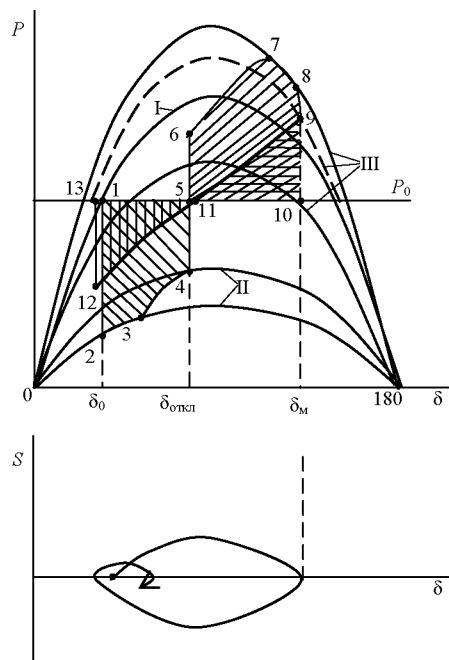


Рис. 1. Угловые характеристики синхронного генератора

В исходном режиме (точка 1) при отсутствии КЗ механическая мощность турбины равна электрической мощности генератора. В момент короткого замыкания суммарное сопротивление схемы сети уменьшается и генератор переходит с угловой характеристики I на угловую характери-

стику II в точку 2 и под действием механического момента турбины начинает ускоряться. После некоторого запаздывания, определяющегося участком 2–3, срабатывает форсировка возбуждения, и ток возбуждения начинает увеличиваться, что приводит к росту электрической мощности (участок 3–4). При угле  $\delta_{отк}$  устраняется короткое замыкание, и генератор переходит на послеаварийную характеристику III (линия 4–6). Энергия при ускорении ротора генератора равна площадке 1–2–3–4–5–1. Участок 6–7 соответствует времени нарастания тока возбуждения до максимального (потолочного) значения. В точке 8 происходит отключение форсировки возбуждения, и генератор переходит на послеаварийную характеристику. Нужно отметить, что время снятия форсировки возбуждения функционально зависит от интеграла избыточного момента на валу машины и выполняется раньше, чем скольжение ротора генератора достигнет нулевого значения [6, 7]. Энергия при торможении ротора генератора равна площадке 5–6–7–8–9–10–5.

При прохождении скольжения ротора генератора через нуль (точка 9) происходит включение расфорсировки возбуждения. Это приводит к уменьшению отрицательной площадки торможения, которая во втором цикле качаний будет равна 9–10–11–9. Когда скольжение ротора генератора достигнет минимального значения (точка 11), происходит отключение расфорсировки возбуждения, а форсировка включается при скольжении, равном 0 (точка 12). При применении расфорсировки возбуждения площадка отрицательного ускорения (площадка 11–12–13–1–5–11) значительно сокращается, что приводит к уменьшению размаха колебаний и скорейшему успокоению синхронной машины.

На примере схемы энергорайона, представленной на рис. 2, для оценки динамической устойчивости по промышленной программе на ЭВМ, выполнены расчеты переходных электромеханических процессов. В качестве возмущения было условно принято трехфазное короткое замыкание на шинах 110 кВ электрической станции, содержащей один генератор. Для наглядности исходные данные по нагрузкам в узлах, сопротивлениям трансформаторов и линий электропередачи нанесены на схему. Исходные данные по синхронному генератору и параметрам его системы возбуждения приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Исходные данные по синхронному генератору станции

$P_{ном}$ , МВт	$U_{ном}$	cosφ	$M_j$ , МВт·с	$X'_d$ , Ом	$X_d$ , Ом	$X_q$ , Ом	$X''_d$ , Ом	$T_{d0}$ , с
70	6,3	0,85	436,5	0,149	0,566	0,566	0,101	4,6

Таблица 2

Исходные данные по возбудителю и регулятору возбуждения синхронного генератора станции

Тип системы	$T$	$U_{PB}^+$	$K_u$	$K_{альфа}$	$T_{PB}$	$T_B$	$E_{qe}^+$	$K_{If}$
Электромашинная с возбудителем постоянного тока	0,04	2	7	10	0,04	0,04	2	10

Исходные данные по уставкам форсировки

$U_{вф}$	$U_{сф}$	$U_{врасф}$	$U_{срасф}$	$K_{ф}$	$K_{расф}$	$T_{вф}$	$T_{врасф}$	$T_1$	$T_2$
0,85	0,95	1,15	1,05	4,00	-4,00	0,04	0,04	0,01	0,01

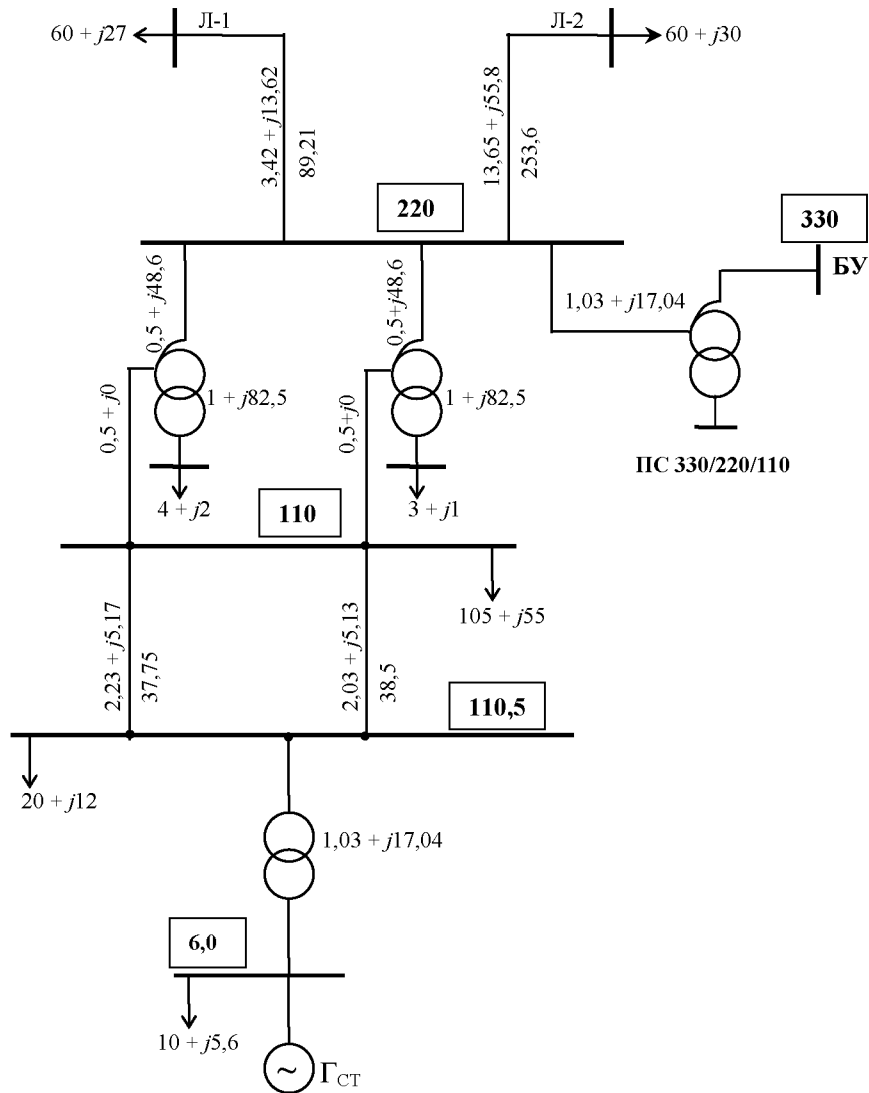


Рис. 2. Диспетчерская схема для исследования динамической устойчивости синхронного генератора электростанции

В соответствии с табл. 2 и 3 приведем описание параметров регулятора возбуждения (РВ) и форсировки возбуждения:  $T_{РВ}$  – постоянная времени РВ, с;  $U_{РВ+}$  – ограничения величины входного сигнала РВ, о. е.;  $K_u$  – коэффициент регулирования по отклонению напряжения, ед. ном. возб./ед. напр.;  $K_{альфа}$  – коэффициент, позволяющий учесть изменение уставки по напряжению при отклонении частоты в сети, о. е.;  $T_v$  – постоянная времени возбудителя, с;  $E_{qe+}$  – максимальное и минимальное значение ЭДС синхронного генератора, о. е.;  $K_{if}$  – коэффициент регулирования по отклонению

нию тока ротора, ед. ном. возб./ед. тока рот.;  $U_{вф}$ ,  $U_{сф}$  – напряжение ввода и снятия форсировки возбуждения, о. е.;  $U_{врасф}$ ,  $U_{срасф}$  – то же расфорсировки возбуждения, о. е.;  $K_{ф}$ ,  $K_{расф}$  – кратность форсировки и расфорсировки возбуждения, о. е.;  $T_{вф}$  – постоянная времени возбудителя при форсировке возбуждения, о. е.;  $T_{врасф}$  – то же при расфорсировке возбуждения, о. е.;

$T_1$  – задержка времени при вводе форсировки и расфорсировки, с;  $T_2$  – то же при снятии форсировки и расфорсировки, с.

На рис. 3 и 4 показаны временные зависимости изменения активной мощности и угла  $\delta$  при отсутствии (зависимость 1) и наличии (зависимость 2) АРВ у исследуемого генератора.

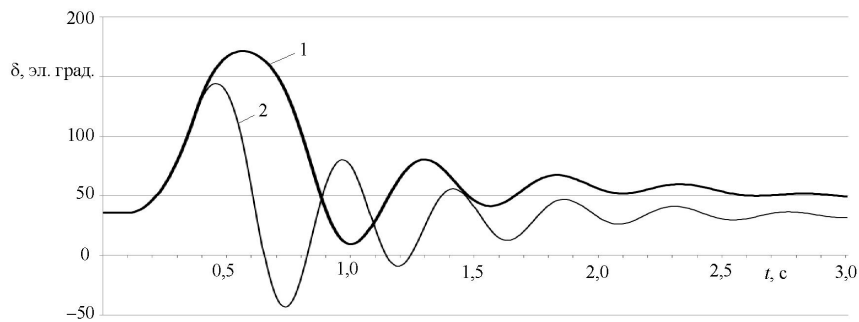


Рис. 3. Зависимости изменения угла  $\delta$  синхронного генератора от времени

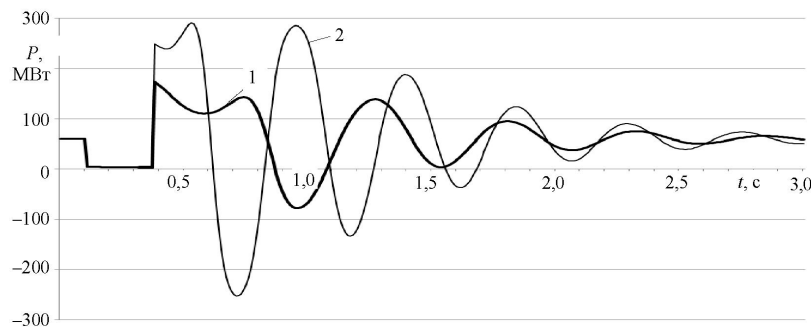


Рис. 4. Зависимости изменения активной мощности синхронного генератора от времени

Как видно из результатов расчета, применение автоматического регулятора возбуждения приводит к уменьшению первоначального вылета угла  $\delta$ , а следовательно, и к повышению динамической устойчивости машины. В то же время увеличивается размах колебаний активной мощности в первых циклах качаний, что может отрицательно сказаться на работе оборудования, вплоть до нарушения динамической устойчивости генераторов электростанции и прекращению параллельной работы с энергосистемой.

В подтверждение теоретических положений, приведенных на рис. 1, выполнены расчеты, результаты которых отражены на рис. 5 и 6. Зависимость 1 соответствует случаю управления форсировкой и расфорсировкой возбуждения в соответствии с заданными в табл. 3 уставками, а зависимость 2 – регулированию тока возбуждения по описанному выше алгоритму. При этом на изменение тока возбуждения в обоих случаях наклады-

ваются ограничения по поддержанию напряжения на шинах генератора в требуемых границах.

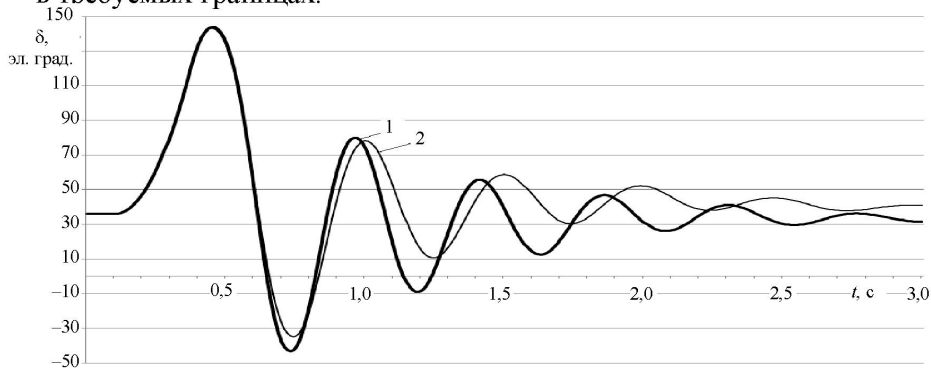


Рис. 5. Зависимости изменения угла  $\delta$  при различных способах регулирования тока возбуждения

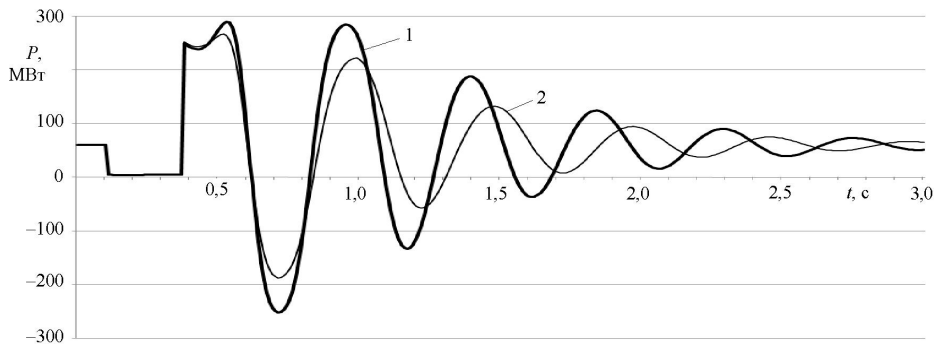


Рис. 6. Зависимости изменения активной мощности синхронного генератора при различных способах регулирования тока возбуждения

При управлении возбуждением синхронного генератора для повышения динамической устойчивости одним из наиболее распространенных показателей качества переходного процесса является минимум интегрального среднеквадратичного отклонения угла  $\delta$  [8]

$$\Pi_{\delta} = \int_0^T \delta_*^2 dt, \quad (1)$$

где  $\delta_*^2$  – отклонение угла ротора генератора относительно исходного.

Дадим количественную оценку переходным процессам, представленным на рис. 5. Для случая управления током возбуждения только по отклонению напряжения на шинах генератора  $\Pi_{\delta 1} = 72,05$  о. е., а при управлении согласно рассмотренному алгоритму  $\Pi_{\delta 2} = 66,4$  о. е. Относительная разность двух рассмотренных способов управления током возбуждения

$$\varepsilon = \frac{\Pi_{\delta 1} - \Pi_{\delta 2}}{\Pi_{\delta 1}} = \frac{72,05 - 66,4}{72,05} \cdot 100 \% = 7,84 \%. \quad (2)$$

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного способа управления возбуждением синхронного генератора.

#### ВЫВОДЫ

Применение автоматического регулирования возбуждения повышает динамическую устойчивость за счет уменьшения первоначального вылета угла  $\delta$ . В то же время увеличивается размах колебаний активной мощности в первых циклах качаний, что может отрицательно повлиять на дальнейшее протекание переходного процесса.

Регулирование тока возбуждения по предложенному алгоритму в зависимости от изменения скольжения и ускорения ротора генератора позволяет улучшить качество переходных процессов за счет снижения размаха колебаний как активной мощности, так и угла  $\delta$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беркович, М. А. Основы автоматики энергосистем / М. А. Беркович, А. Н. Комаров, В. А. Семенов. – М.: Энегоиздат, 1981. – 432 с.
2. Павлов, Г. М. Автоматики энергосистем / Г. М. Павлов, Г. В. Меркурьев. – СПб.: Издание Центра подготовки РАО «ЕЭС России», 2001. – 388 с.
3. Калентиенок, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентиенок. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
4. Баркан, Я. Д. Автоматизация энергосистем: учеб. пособие / Я. Д. Баркан, Л. А. Орехов. – М.: Высш. шк., 1981. – 271 с.
5. Устройство для регулирования возбуждения синхронной машины: пат. 13305 Респ. Беларусь. МПК (2009) Н 02 Р 9/10, Н 02 Р 9/14 / Е. В. Калентиенок, Ю. Д. Филиппик; заявитель БНТУ. – № а 20071249; заявл. 16.10.07; опубл. 30.06.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010.
6. Устройство для форсировки возбуждения синхронных машин: а. с. 434555 СССР МКИ Н02 р 9/10 / Д. В. Никитин, В. А. Строев, В. А. Штробель, И. А. Васильев (Московский ордена Ленина энергетический институт).
7. Симеонова, К. Ж. Вопросы выбора параметров АРВ в сложных электроэнергетических системах / К. Ж. Симеонова, В. А. Строев // Энергетика и транспорт... (Изв. АН СССР). – 1987. – № 5. – С. 61–71.
8. Веников, В. А. Теория оптимального управления электрическими системами и задачи повышения их устойчивости / В. А. Веников, М. Г. Портной // Электричество. – 1974. – № 3. – С. 9–15.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 14.03.2011