

ФАЗОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА С РАЗОМКНУТЫМ КОНТУРОМ БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ. МОДЕЛЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ PID

АВТОРЫ:

ЦЗЯ ФЭНЧЯН,
NR ELECTRIC CO., LTD,
НАНКИН, КНР

МОУ ВЕЙ,
NR ELECTRIC CO., LTD,
НАНКИН, КНР

Eще совсем недавно при изучении фазочастотных характеристик генераторов с разомкнутым контуром для упрощения анализа регулятора возбуждения трактовался как простой пропорциональный регулятор, и при этом, чтобы понять принципы работы и настройки параметров стабилизатора энергосистемы, анализировались только факторы, влияющие на фазочастотные характеристики генератора с разомкнутым контуром без компенсации. Однако в настоящее время все большей популярностью пользуется идея тщательного анализа активных низкочастотных колебаний и их влияния на процессы регулирования возбуждения генератора.

Ключевые слова: стабилизатор системы электропитания; фазочастотные характеристики с разомкнутым контуром без компенсации; PID-модель.



ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 60-х годов прошлого столетия в системах передачи электроэнергии различных крупных компаний при восстановлении динамической устойчивости после аварийных ситуаций в процессе восстановления динамической устойчивости все чаще стали возникать низкочастотные асинхронизированные колебания активной мощности. В настоящее время специалисты электроэнергетики уделяют большое внимание выяснению причин и механизмов возникновения данного явления. После введения в модель Филипса — Хаффрана динамической линеаризации генератора она стала базой исследований по принципу активных низкочастотных колебаний и подавителей в энергосистемах на протяжении нескольких десятилетий. Модель Филипса — Хаффрана, базирующаяся на SMIB (Single Machine Infinite Bus), успешно объясняет условия, при которых происходят активные низкочастотные колебания, на основе чего был разработан стабилизатор энергосистемы. Он до сих пор является наиболее экономичным и эффективным техническим средством для улучшения положительно-го демпфирования энергосистемы и подавления ее низкочастотных [0,1~2,5 Гц] колебаний.

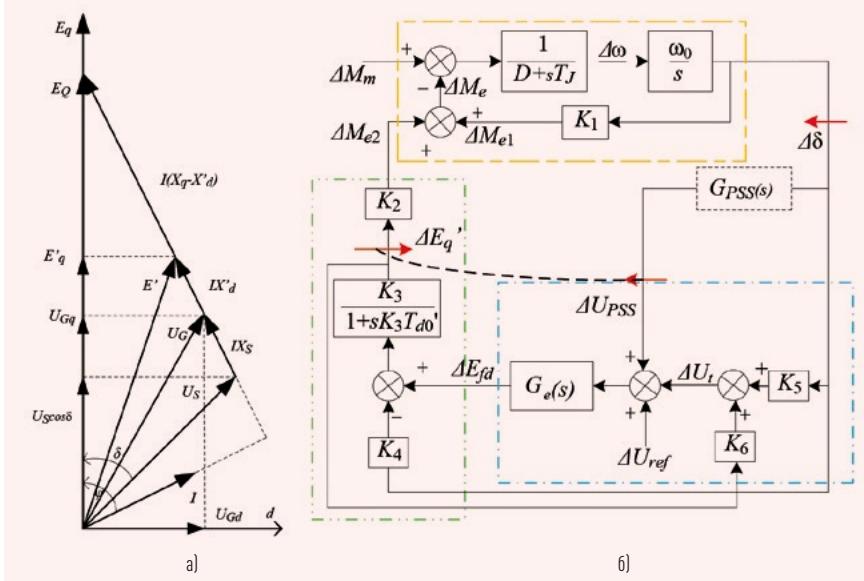
В прошлом, когда в профессиональной сфере изучали анализ фазочастотных характеристик генератора с разомкнутым контуром без компенсации на основе модели Филипса — Хаффрана, для упрощения к регулятору возбуждения всегда относились как к простой пропорциональной регулировке, анализировали факторы, влияющие на фазочастотные характеристики генератора с разомкнутым контуром без компенсации, чтобы объяснить принцип работы и принцип настройки параметров стабилизатора энергосистемы. Однако с развитием новой технологии модель регулирования возбуждения стала редко использовать пропор-

циональное регулирование в практическом инжиниринге, теперь усиление регулирования возбуждения варьируется в зависимости от частоты. Так каковы последствия этих изменений для демпфирующих моментов и настройки параметров стабилизатора энергосистемы, которые работают на основе фазочастотных характеристик? Автор на базе модели Филипса — Хаффрана объясняет модель регулирования PID, приводит теоретические формулы, описывает модель задержки возбуждения генератора, теоретическую модель функции с разомкнутым контуром регулирования возбуждения без компенсации, модель функции с замкнутым контуром регулирования возбуждения без компенсации, с помощью примеров и параметров регулирования возбуждения анализирует связь между моделью регулирования возбуждения и всеми фазочастотными характеристиками генератора.

МОДЕЛЬ ФИЛИПСА — ХАФФРона И МОМЕНТ СИЛЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Каждое электрическое фазовое соотношение генератора в процессе работы генератора с шиной бесконечной мощности (Infinite Bus) показано на рис. 1 а. Если на основе схемы электрического фазового соотношения в сочетании с генераторным электромеханическим уравнением движения провести математическую обработку линеаризации в точке движения, получим соотношение между изменением скорости вращения $\Delta\omega$, изменением угла между вращающимся ротором и вращающимся магнитным полем

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ГЕНЕРАТОРА И МОДЕЛЬ ФИЛИПСА — ХАФФРона



статора $\Delta\delta$, изменением переходного электрического потенциала $\Delta E'_q$, изменением электромагнитного момента ΔM_{e2} , изменением напряжения тока ΔU_t и изменением напряжения возбуждения ΔE_{fd} . Это и есть модель генератора Филипса — Хаффрана. На рис. 1 б в оранжевой рамке в верхней части рисунка представлено уравнение электромеханической работы генератора, ΔM_{e2} генерирует блок-схему $\Delta\omega$ и $\Delta\delta$ посредством электромеханического уравнения. В синей рамке в правом нижнем углу рис. 1 б представлен модуль регулировки возбуждения, при этом $\Delta\delta$ и $\Delta E'_q$ производят ΔU_t , которое рассчитывается и регулируется системой возбуждения для вывода ΔE_{fd} . В зеленой рамке в нижнем левом углу представлен модуль создания электромагнитного момента, $\Delta\delta$ через реакцию якоря с ΔE_{fd} производят $\Delta E'_q$ и появляется ΔM_{e2} .

На основе соотношения между параметрами генератора и фазами в работе выводится формула для коэффициентов, показанная на рис. 1 б:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{x_q - x'_d}{x'_d + x_e} i_{q0} u_s \sin \delta_0 + \frac{u_s \cos \delta_0}{x_q + x_e} E_{q0}; \\ K_2 &= \frac{x_q + x_e}{x'_d + x_e} i_{q0}; \quad K_3 = \frac{x'_d + x_e}{x_d + x_e}; \\ K_4 &= \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x_e} u_s \sin \delta_0; \\ K_5 &= \frac{u_{td0}}{u_{t0}} \frac{x_q}{x_q + x_e} u_s \cos \delta_0 - \\ &- \frac{u_{tq0}}{u_{t0}} \frac{x_q}{x'_d + x_e} u_s \sin \delta_0; \quad K_6 = \frac{u_{tq0}}{u_{t0}} \frac{x_e}{x'_d + x_e}. \end{aligned} \quad (1)$$

Все вышеуказанные коэффициенты, за исключением K_5 , положительны при нормальной работе ($K_5 > 0$ при малом значении $\Delta\delta$) и могут быть меньше 0 при большом значении $\Delta\delta$. Параметр $\Delta\delta - \Delta\omega$ может использоваться в качестве функции передачи входных данных, а фаза выражается в координатах с $\Delta\delta$ в качестве горизонтальной оси и $\Delta\omega$ в качестве вертикальной оси [рис. 2 а].

При низкочастотных колебаниях $\Delta\delta$ приводит к ΔU_t момент силы ΔM_{e22} регулирования возбуждения является компонентом ΔM_{e2} через выходы регулировки возбуждения, его соотношение с $\Delta\delta$ имеет вид:

$$\Delta M_{e22} = \frac{K_2 K_3 G_e(s) K_5}{1 + K_3 G_e(s) K_6 + S K_3 T'_{do}} (-\Delta\delta), \quad (2)$$

В формуле (2) K_2 , K_3 и $K_5 > 0$, когда $K_6 > 0$, ΔM_{e22} находится на верхней половине, направление его демпфирующего момента одинаково с аналогичным показателем $\Delta\omega$ и считается положительным демпфированием, как показано на рис. 2 а. Когда $K_6 < 0$, ΔM_{e22} находится на нижней половине, направление его момента силы демпфирования противоположно с аналогичным показателем $\Delta\omega$ и считается негативным демпфированием, как показано на рис. 2 б.

ФАЗА PSS И ФАЗОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗОМКНУТОГО КОНТУРА ГЕНЕРАТОРА БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ

Из приведенного выше анализа видно, что на рис. 1 б в модели Филипса — Хаффрана электрическая вели-

ПЛОСКОСТЬ И ДЕМПФИРОВАНИЕ $\Delta\delta - \Delta\omega$ ВЫХОДНОГО МОМЕНТА СИЛЫ PSS: А) ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ; Б) ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ

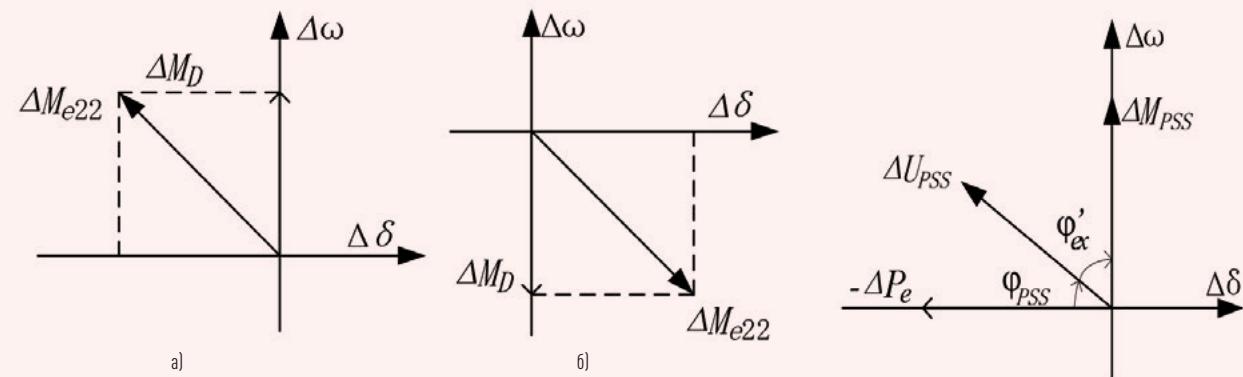


Рис. 2

чины регулятора возбуждения (ΔU_{PSS}), связанная с $\Delta\delta$, вводится на входе. Регулировка коэффициента корреляции может генерировать дополнительный положительный демпфирующий момент для компенсации отрицательного демпфирования, вызывающего низкочастотные колебания активной мощности, и достичь цели подавления низкочастотных колебаний.

Это принцип работы стабилизаторов энергосистемы (PSS). Такие примеры были в инженерной практике. Во времена, когда стабилизаторы энергосистемы не получили широкого распространения, уже были инженеры-наладчики, которые использовали простые схемы для ввода приращений мощности в регулятор возбуждения, чтобы решить проблему активных низкочастотных колебаний генератора.

Если PSS просто вводит произведение $\Delta\delta$ с коэффициентом в регулирование возбуждения, хотя создаваемый дополнительный момент силы находится в верхней полуплоскости рис. 2 а, компонент демпфирующего момента силы положителен, но конкретное положение определяется параметрами модели регулирования возбуждения и моделью Филипса — Хаффрана. Разные положения имеют разные компоненты демпфирующего момента силы. Фактически, чтобы полностью раскрыть функции PSS, всегда следует предполагать, что дополнительный момент силы, создаваемый PSS, будет положительным демпфирующим моментом силы. Это соответствует направлению вертикальной оси $\Delta\omega$, т. е. мы ожидаем фазу на плоскости $\Delta\delta - \Delta\omega$ при выходном сигнале PSS ΔU_{PSS} , к тому же фаза между ΔM_{e22} и ΔU_{PSS} имеет то же направление, что и $\Delta\omega$, как показано на рис. 2 б. Таким образом, PSS является не простым коэффициентом, а передаточной функцией $GPSS(s)$, которая может регулировать фазовое соотношение. Наоборот, если

ФАЗОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ РАЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ АКТИВНОГО ВЫХОДА

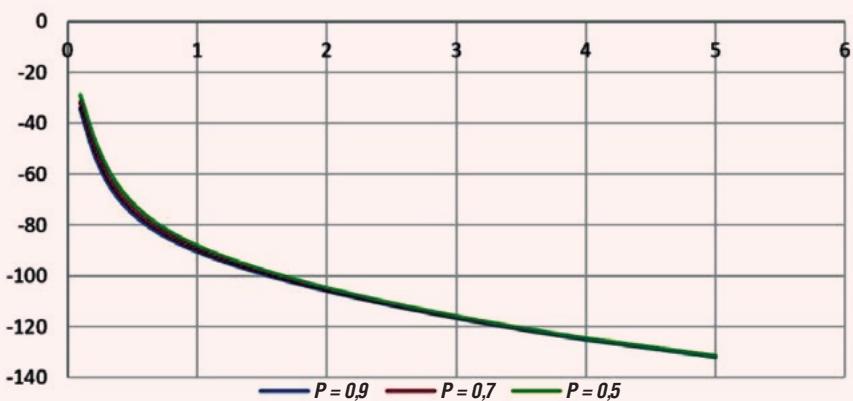


Рис. 3

ФАЗОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ РАЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ РЕАКТИВНОГО ВЫХОДА

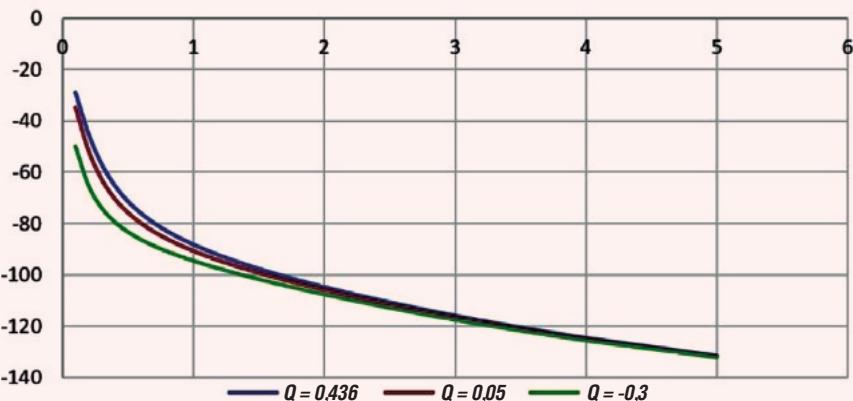


Рис. 4

мы знаем фазу между ΔM_{e22} и ΔU_{PSS} , согласно требованиям оптимального демпфирующего момента,

то можем достичь фазовой цели $GPSS(s)$, чтобы настроить параметры в $GPSS(s)$.

Поскольку $K_2 > 0$, ΔM_{e22} и $\Delta E'_q$ имеют одинаковую фазу, фазочастотные характеристики между ΔM_{e22} и ΔU_{PSS} являются также фазочастотными характеристиками между $\Delta E'_q$ и ΔU_{PSS} .

Фазочастотная характеристика с разомкнутым контуром между $\Delta E'_q$ и ΔU_{PSS} называется теоретической фазочастотной характеристикой без компенсации в режиме онлайн-регулирования возбуждения. Иными словами, имеется в виду фазочастотная характеристика переходного потенциала $\Delta E'_q$ относительно ΔU_{PSS} выходного сигнала PSS при разомкнутом контуре в Δb в модели Филипса — Хаффона на рис. 1 б. Ее передаточная функция имеет вид:

$$W'_{ex}(s) = \frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{K_3 G_e(s)}{1 + K_3 G_e(s) K_6 + s K_3 T'_{d0}}, \quad [3]$$

Ее фазочастотные характеристики связаны с параметрами K_3 , K_6 в модели регулирования возбуждения PID и модели генератора Филипса — Хаффона.

ФАЗОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

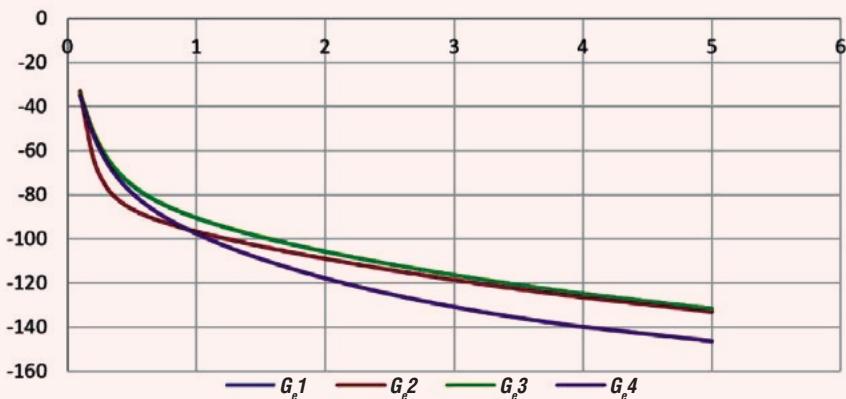


Рис. 5

Ниже приводится анализ особенностей теоретической фазочастотной характеристики без компенсации в режиме онлайн-регулирования возбуждения, согласно принципу устранения вразбивку PID-возбуждения ϕ'_{ex} . Принимая во внимание процесс измерения регулятора возбуждения и задержки управления, в инженеринге PID-модель последовательного соединения системы возбуждения (включая возбудитель) может быть выражена следующей формулой:

$$G_e(s) = K_s \frac{1 + sT_c}{(1 + sT_d)(1 + sT_R)}.$$

В формуле T_R — это эквивалентное звено малой задержки, обычно оно составляет $0,02s \sim 0,07s$. Тогда формула [3] принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{K_3 K_s (1 + T_c s)}{F}, \quad (4)$$

где $F = 1 + K_3 K_6 K_s + s(T_d + T_R + K_3 T'_{d0} + K_3 K_6 K_s T_c) + s^2(T_d T_R + K_3 T'_{d0}(T_d + T_R)) + s^3 K_3 T'_{d0} T_d T_R$.

Для модели PID параллельного соединения передаточная функция системы возбуждения равна

$$G_e(s) = K_p + \frac{1}{sT_I} = \frac{1 + sT_I K_p}{sT_I}.$$

Тогда формула [3] принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{K_3 (1 + sT_I K_p)}{Z}, \quad (5)$$

где $Z = K_3 K_6 + s(T_I + K_3 K_6 K_p T_I) + s^2(T_I T_R + K_3 T'_{d0} T_I) + s^3 K_3 T'_{d0} T_I T_R$.

ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ (ИЗ ПРИКАЗА МИНЕРГО РОССИИ ОТ 13.02.2019 № 98)

Синхронные генераторы мощностью 60 МВт и более должны быть оснащены быстродействующими системами возбуждения.

Системы возбуждения синхронных генераторов мощностью 60 МВт и более, а также системы возбуждения синхронных генераторов мощностью менее 60 МВт в случае, если системы возбуждения таких генераторов имеют в своем составе АРВ сильного действия, должны иметь следующие характеристики:

- быстродействие системы возбуждения при форсировке — не более 0,06 секунды для статических систем возбуждения и 0,12 секунды для бесщеточных и высокочастотных систем возбуждения;
- полное время расфорсировки — не более 0,12 секунды для статических систем возбуждения и 0,3 секунды для бесщеточных и высокочастотных систем возбуждения;
- запаздывание системы возбуждения при форсировке — не более 0,02 секунды.

Можно доказать, что фазочастотные характеристики формул (4) и (5) примерно одинаковы при одинаковом динамическом усилии. Во всех расчетах в данной статье формула (4) используется в качестве примера.

Анализируя характеристики передаточной функции с помощью формулы (4), видим, что все коэффициенты положительны; числитель представляет собой многочлен первой степени; при изменении частоты диапазона изменения фазы составляют $0 \sim 90^\circ$; знаменатель — многочлен третьей степени; при изменении частоты диапазон фаз равен $0 \sim 270^\circ$; теоретическая фазочастотная характеристика с разомкнутым контуром без компенсации регулирования возбуждения является задержкой; максимальный угол задержки составляет менее 180° .

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ ФАЗОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА С РАЗОМКНУТЫМ КОНТУРОМ БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ

Далее в качестве примера расчета влияющих факторов фазочастотных характеристик с разомкнутым контуром без компенсации теоретического регулирования возбуждения используются генератор электростанции и модель регулирования возбуждения.

Параметры генератора таковы:

$$X_d = 2,0; X_q = 2,0; X_d' = 0,33; X_e = 0,1; T_d' = 8,5s; U_S = 1,05.$$

Параметры регулирования возбуждения следующие:

$$K_s = 500; T_c = 4,0s; T_d = 40,0s; K_d = 50.$$

1. Факторы влияния активной мощности генератора. Определим влияние активной мощности на фазочастотные характеристики с разомкнутым контуром без компенсации теоретического регулирования возбуждения при постоянном коэффициенте мощности.

a. Когда активная мощность генератора $P = 0,9$, реактивная $Q = 0,0735$, напряжение $U_t = 1,0535$, тогда:

$$K_1 = 2,05; K_2 = 2,11; K_3 = 0,2048; K_4 = 3,52; K_5 = 0,0147; K_6 = 0,133,$$

а формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s4,0)}{14,63 + s96,292 + s^270,87 + s^32,09}. \quad (6)$$

b. Когда активная мощность генератора $P = 0,7$, реактивная $Q = 0,0444$, напряжение $U_t = 1,052$, тогда:

$$K_1 = 1,83; K_2 = 1,9535; K_3 = 0,2048; K_4 = 3,262; K_5 = 0,0375; K_6 = 0,151.$$

В этом случае формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s4,0)}{16,5 + s103,626 + s^270,87 + s^32,09}. \quad (7)$$

c. Когда активная мощность генератора $P = 0,5$, реактивная $Q = 0,023$, напряжение $U_t = 1,051$, тогда:

$$K_1 = 1,5; K_2 = 1,684; K_3 = 0,2048; K_4 = 2,81; K_5 = 0,056; K_6 = 0,1755.$$

В этом случае формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s4,0)}{19,97 + s113,64 + s^270,87 + s^32,09}. \quad (8)$$

Фазочастотные характеристики из формул (6) — (8) представле-

ны на рис. 3. Из рисунка видно, что при различных активных нагрузках в теоретической системе возбуждения в онлайн-режиме фазочастотные характеристики с разомкнутым контуром без компенсации ϕ'_{ex} в основном одинаковы: очень мала разница в диапазоне высоких частот, низкочастотный диапазон имеет отставание при большой активной мощности.

2. Факторы влияния реактивной мощности. Рассчитаем влияние реактивной мощности на фазочастотные характеристики с разомкнутым контуром без компенсации теоретического регулирования возбуждения при постоянной активной мощности.

a. Когда активная мощность генератора $P = 0,9$, реактивная $Q = 0,436$, напряжение $U_t = 1,087$, тогда:

$$K_1 = 1,923, K_2 = 1,75, K_3 = 0,2048, K_4 = 2,922, K_5 = 0,0258, K_6 = 0,175.$$

В этом случае формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s4,0)}{18,9 + s113,376 + s^270,87 + s^32,09}. \quad (9)$$

b. Когда активная мощность генератора $P = 0,9$, реактивная $Q = 0,05$, напряжение $U_t = 1,051$, тогда:

$$K_1 = 2,06, K_2 = 2,133, K_3 = 0,2048, K_4 = 3,562, K_5 = 0,01283, K_6 = 0,1294.$$

В этом случае формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s4,0)}{14,25 + s94,75 + s^270,87 + s^32,09}. \quad (10)$$

c. Когда активная мощность генератора $P = 0,9$, реактивная $Q = -0,3$, напряжение $U_t = 1,0167$, тогда:

$$K_1 = 2,13, K_2 = 2,414, K_3 = 0,2048, K_4 = 4,03, K_5 = -0,03944, K_6 = 0,0543,$$

а формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s4,0)}{6,565 + s64,03 + s^270,87 + s^32,09}. \quad (11)$$

Фазочастотные характеристики из формул (9)–(11) представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что при различных реактивных нагрузках в теоретической системе возбуждения в онлайн-режиме фазочастотные характеристики с разомкнутым контуром без компенсации Φ_{ex} в основном одинаковы: очень мала разница в диапазоне высоких частот, чем ниже реактивная мощность в низкочастотном диапазоне, тем больше задержка.

3. Факторы влияния параметров возбуждения. Определим влияние изменения параметров модели регулирования возбуждения на фазочастотные характеристики с разомкнутым контуром без компенсации теоретического регулирования возбуждения при постоянных активной мощности (0,9), реактивной мощности (0,05) и $K_1 \sim K_6$.

a. Когда $K_s = 500$, $T_c = 4s$, $T_d = 40s$, $T_R = 0,03$, формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s4,0)}{14,25 + s94,75 + s^270,87 + s^32,09}. \quad (12)$$

6. Когда $K_s = 500$, $T_c = 1s$, $T_d = 10s$, $T_R = 0,03$, формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s1,0)}{14,25 + s25,016 + s^217,76 + s^30,522}. \quad (13)$$

B. Когда $K_s = 300$, $T_c = 4s$, $T_d = 24s$, $T_R = 0,03$, формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{61,44(1 + s4,0)}{8,947 + s57,56 + s^242,544 + s^31,253}. \quad (14)$$

г. Когда $K_s = 500$, $T_c = 4s$, $T_d = 40s$, $T_R = 0,05$, формула (4) принимает вид:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta U_{PSS}} = \frac{102,4(1 + s4,0)}{14,25 + s94,77 + s^271,71 + s^33,48}. \quad (15)$$

Фазочастотные характеристики из формул (12)–(15) представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что динамическое усиление модели регулирования возбуждения влияет на фазочастотную характеристику с разомкнутым контуром без компенсации теоретического регулирования возбуждения в онлайн-режиме Φ_{ex} . T_R имеет большое влияние на характеристики высокочастотной задержки. Значит, при использовании различных методов регулирования возбуждения, когда коэффициент мощности близок к единице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фазочастотные характеристики с разомкнутым контуром без компенсации в онлайн-режиме теоретического регулирования возбуждения определяют эффективность функции PSS, по сути они являются основой настройки параметров PSS, тесно связаны с условиями работы генератора и параметрами модели регулирования возбуждения.

ЛИТЕРАТУРА

- Shabib G., Esam H. and Abd-Elhameed G. Magdy. A New Approach to the Digital Implementation of Analog Controllers for a Power System Control//International Journal of Scientific & Engineering Research (IJSER). 2014. № 5. P. 419–427.
- Pavan P., Rbabu M. and Swathi S. Dynamic analysis of Single Machine Infinite Bus System Using Single Input and Dual Input PSS//IEEJ. 2012. № 3. P. 632–641.

- Piyush Chaubey, J. S. Lather, Srinivas Yelisetty, et al. Robust Power System Stabilizer based on Static Output Feedback Approach to Enhance Power System Stability. 2019. № 158. P. 2960–2965.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

δ — угол между потенциалом и напряжением на выводе генератора;

E' — переходный потенциал;
 U_G — напряжение на выводе генератора;

U_S — напряжение системы;
 I — ток статора;

IX_d' — падение напряжения переходного сопротивления по оси d ;

IX_S — падение напряжения сопротивления системы;

U_{Gd} — составляющая напряжения на выводе генератора по оси d ;

ΔM_m — приращение механического момента;

T_{d0} — константа времени статора генератора при КЗ статора;

ΔM_{e2} — приращение электромагнитного момента, обеспечиваемое системой возбуждения;

ΔM_{e1} — приращение электромагнитного момента, измеряемое первичным двигателем;

D — момент инерции;

T_J — константа времени инерции генератора;

ΔU_{PSS} — изменение напряжения системы PSS;

$G_e(s)$ — передаточная функция системы возбуждения;

X_d' — переходное реактивное сопротивление по оси d ;

Ψ — угол между током статора и потенциалом;

$G_{PSS}(S)$ — передаточная функция системы PSS;

ΔU_{ref} — изменение опорного напряжения;

i_{q0} — начальное значение тока по оси q ;

δ_0 — начальное значение угла мощности;

x_e — импеданс подключения к системе;

E_∞ — начальное значение для потенциала по оси q при $xd=xq$;

x_d — реактивное сопротивление по оси d ;

U_{tq0} — начальное значение для составляющей по оси q напряжения на выводе генератора;

U_{t0} — начальное значение для составляющей напряжения на выводе генератора;

ΔP_e — изменение активной мощности генератора;

Φ_{PSS} — угол между входом и выходом для системы PSS;

Φ_{ex} — угол между $\Delta\omega$ и выходом для системы PSS;

ΔM_{PSS} — приращение от изменения момента PSS;

$W'_{ex}(s)$ — передаточная функция;

K_p — масштабный коэффициент для системы возбуждения;

T_i — константа времени инерции фильтрующего звена для системы возбуждения;

T_R — константа времени инерции генератора.