

УДК 621.311

**УЧЕТ АРВ ГЕНЕРАТОРОВ
ПРИ РАСЧЕТАХ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ACCOUNTING ARV GENERATORS WHEN CALCULATING
THE STATIC STABILITY**

В.Ю. Курбан, Д.А. Куган

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

V. Kurban, D. Kugan

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk

***Аннотация:** в ходе работы рассмотрены математические модели генераторов с АРВ и выполнена их оценка влияния на энергосистему.*

***Abstract:** in the course of the work, mathematical models of generators with ARV were considered and their impact on the power system was assessed.*

***Ключевые слова:** электроэнергетическая система, АРВ, статическая устойчивость.*

***Keywords:** electric power system, ARV, static stability.*

Введение

При проектировании систем, следует учитывать наличие устройств АРВ на генераторах, так как они существенно влияют на устойчивость. Для оценки данного влияния существуют разные методы, которые позволяют произвести оценку без решения характеристического уравнения.

При отсутствии устройства АРВ, ЭДС определяется по следующему выражению:

$$P = E_{q0} \cdot U \cdot \sin(\delta) / (x_d + x_{\text{вн}}), \quad (1)$$

где E_{q0} – синхронная продольные ЭДС.

При увеличении передаваемой мощности в сеть, начинает увеличиваться угол δ . При соблюдении условия равенства модулей ЭДС, начинает уменьшаться напряжение на зажимах генератора, и его предел мощности в (1) уменьшается при $\delta = \pi / 2$. Если генератор с устройством АРВ, то изменение этого угла, приводит к изменению модуля напряжения генератора.

Основная часть

Переходный процесс (ПП) в системе с АРВ на генераторах описывается уравнениями [1]:

- уравнение относительного движения ротора генератора:

$$\left(\frac{T_J}{\omega_0} \right) \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - \frac{E_q U \sin \delta}{x_d};$$

- уравнение ПП в роторе генератора:

$$T_{d0} \cdot \frac{dE_q}{dt} + E_q = E_{q,e};$$

- уравнение ПП в цепи возбуждения возбудителя:

$$T_e \cdot \frac{dE_{q,e}}{dt} + E_{q,e} = U_p,$$

где T_J – постоянная механическая инерции генератора;

ω_0 – угловая скорость в установившемся синхронном режиме;

E_q – переходная продольная ЭДС;

Из анализа этой системы уравнений можно определить характер движения (оценить устойчивость). Для этого проводят линеаризацию нелинейных уравнений и получают характеристическое уравнение вида:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + (a_2 + K_U \cdot \Delta_2) p^2 + a_3 p + a_4 + K_U \cdot \Delta_4 = 0,$$

где $a_0 = \frac{T_J}{\omega_0} T_{d0} T_e \frac{\partial E_q}{\partial E_q}$;

$$a_1 = \frac{T_J}{\omega_0} \left(T_e + T_{d0} \frac{\partial E_q}{\partial E_q} \right);$$

$$a_2 = \frac{T_J}{\omega_0} + T_{d0} T_e \left[\frac{\partial E_q}{\partial E_q} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} - \frac{\partial E_q}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial P}{\partial E_q} \right];$$

$$a_3 = T_{d0} \left[\frac{\partial E_q}{\partial E_q} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} - \frac{\partial E_q}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial P}{\partial E_q} \right];$$

$$a_4 = \frac{\partial P}{\partial \delta};$$

$$\Delta_2 = \frac{T_J}{\omega_0} \frac{\partial U_{\Gamma}}{\partial E_q}; \Delta_4 = \frac{\partial U_{\Gamma}}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} - \frac{\partial U_{\Gamma}}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial P}{\partial E_q}.$$

В приведенных выражения приняты следующие обозначения:

T_e – постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя (ОВВ);

T_d – постоянная времени обмотки возбуждения генератора (ОВГ) при разомкнутой обмотке статора;

X_d – синхронное реактивное сопротивление по продольной оси;

X_d' – переходное реактивное сопротивление по продольной оси.

После подстановки частных производных получим [1]:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{T_J}{\omega_0} T_d T_e; a_1 = \frac{T_J}{\omega_0} (T_d + T_e) \\ a_2 &= \frac{T_J}{\omega_0} + T_d T_e \left(\frac{E_q U}{X_d} \cos \delta + U^2 \frac{X_d - X_d'}{X_d X_d'} \sin^2 \delta \right) \\ a_3 &= T_d \left(\frac{E_q U}{X_d} \cos \delta + U^2 \frac{X_d - X_d'}{X_d X_d'} \sin^2 \delta \right) + T_e \frac{E_q U}{X_d} \cos \delta \\ a_4 &= \frac{E_q U}{X_d} \cos \delta; \Delta_2 = \frac{T_J}{\omega_0} \cdot \frac{X_{\text{вн}}}{X_d} \\ \Delta_4 &= \left(\frac{E_q U}{X_d} \cos \delta + U^2 \frac{X_d - X_{\text{вн}}}{X_d X_{\text{вн}}} \sin^2 \delta \right) \frac{X_{\text{вн}}}{X_d} \end{aligned} \right\}$$

где $T_d' = \frac{T_{d0} X_d'}{X_d}$.

Покажем пример расчета статической устойчивости на примере электроэнергетической системы, представленной на рисунке 1. Проведем два расчета при разных коэффициентах усиления $K_U^{(1)} = 30; K_U^{(2)} = 50$.

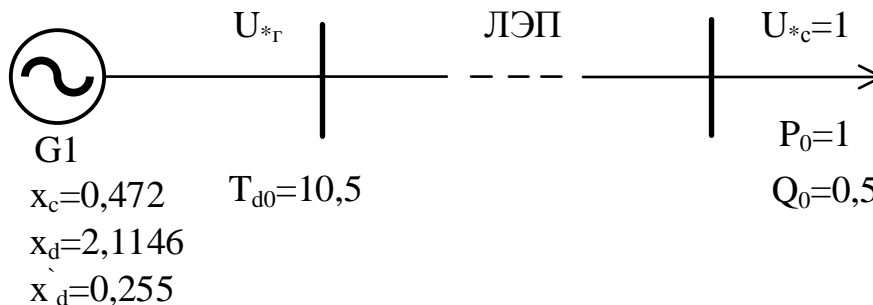


Рисунок 1 – Схема электроэнергетической системы

Необходимо найти уравнение угловой характеристики, построить график данной характеристики. Вычислить коэффициент запаса.

Решение, принимаем $K_U^{(1)} = 30$. Из расчета режима с АРВ: $\delta = 48^\circ; \delta' = 28^\circ$.

Найдем суммарные сопротивления схемы замещения СЭС:

$$X_d = x_d + x_c = 2,114 + 0,472 = 2,586;$$

$$X_d' = x_d' + x_c = 0,255 + 0,304 = 0,727.$$

Постоянная времени:

$$T_d' = T_{d0} \cdot X_d' / X_d = 10,5 \cdot 0,727 / 2,586 = 2,951.$$

Электродвижущая сила:

$$E_{q0} = \sqrt{(U^2 + Q_0 \cdot X_d)^2 + (P_0 \cdot X_d)^2} / U =$$

$$= \sqrt{(1^2 + 0,5 \cdot 2,586)^2 + (1 \cdot 2,586)^2} = 3,456.$$

Напряжение генератора:

$$U_{\Gamma} = E_{q0} \cdot x_c / X_d + U \cdot \cos(\delta_0) \cdot (X_d - x_c) / X_d = 3,456 \cdot 0,472 /$$

$$/ 2,586 + 1 \cdot \cos(48^\circ) \cdot (2,586 - 0,472) / 2,586 = 1,178.$$

Синхронная ЭДС с учетом коэффициента усиления:

$$E_q = \left[E_{q0} + K_U \cdot \left(U_{\Gamma} - U \cdot \cos(\delta) \cdot \frac{X_d - x_c}{X_d} \right) \right] / \left(1 + K_U \cdot \frac{x_c}{X_d} \right) =$$

$$= \left[3,456 + 30 \cdot \left(1,291 - \cos(\delta) \cdot \frac{2,586 - 0,472}{2,586} \right) \right] / \left(1 + 30 \cdot \frac{0,472}{2,586} \right) =$$

$$= 5,991 - 3,787 \cdot \cos(\delta).$$

Уравнение угловой характеристики с АРВ $K_U = 30$:

$$P = E_q \cdot U \cdot \sin(\delta) / X_d = (5,991 - 3,787 \cdot \cos(\delta)) \cdot 1 \cdot \sin(\delta) / 2,586 =$$

$$= 2,317 \sin(\delta) - 0,732 \sin(2\delta).$$

Получив результат, проведем расчет еще раз при $K_U = 50$.

Синхронная ЭДС с учетом коэффициента усиления:

$$E_q = \left[E_{q0} + K_U \cdot \left(U_{\Gamma} - U \cdot \cos(\delta) \cdot \frac{X_d - x_c}{X_d} \right) \right] / \left(1 + K_U \cdot \frac{x_c}{X_d} \right) =$$

$$= \left[3,456 + 50 \cdot \left(1,291 - \cos(\delta) \cdot \frac{2,586 - 0,472}{2,586} \right) \right] / \left(1 + 50 \cdot \frac{0,472}{2,586} \right) =$$

$$= 6,716 - 4,938 \cdot \cos(\delta).$$

Уравнение угловой характеристики с АРВ $K_U = 50$:

$$P = E_q \cdot U \cdot \sin(\delta) / X_d = (6,716 - 4,938 \cdot \cos(\delta)) \cdot 1 \cdot \sin(\delta) / 2,586 =$$

$$= 2,597 \sin(\delta) - 0,955 \sin(2\delta).$$

Так же, имея схожее уравнение угловой характеристики для генераторов с АРВ запишем его, и по нему построим угловую характеристику (рисунок 3), а после сравним полученные результаты:

$$P = \frac{E_d \cdot U}{X_d} \sin(\delta) - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_q - x_d}{X_q \cdot X_d} \sin(2\delta) = 2,04 \sin(\delta) - 0,42 \sin(2\delta).$$

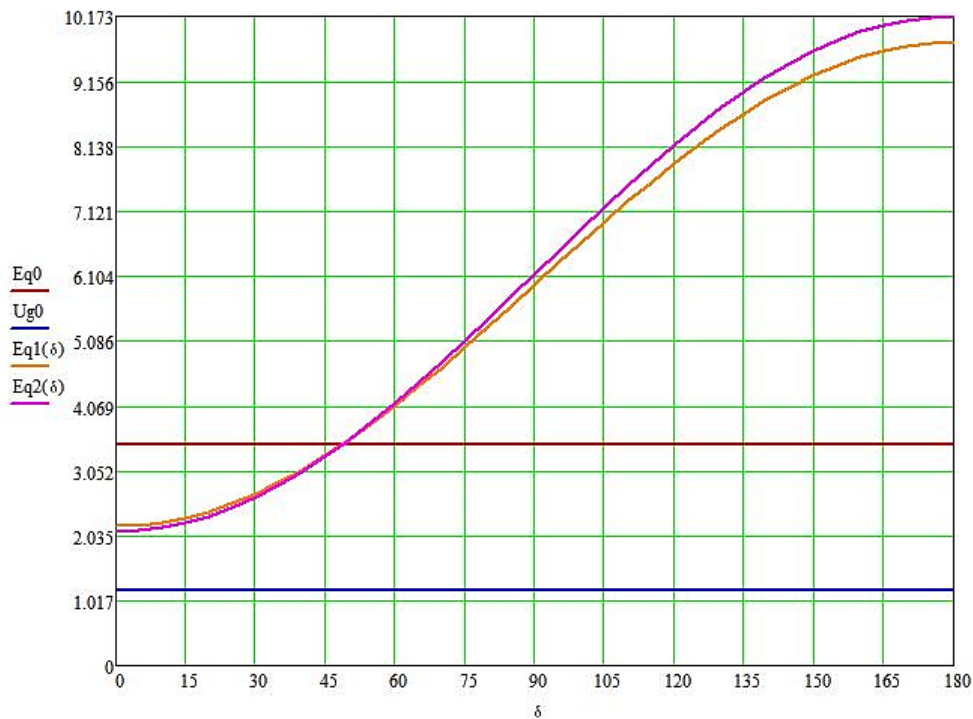


Рисунок 2 – Совмещенные графики ЭДС

На рисунке 2 представлены зависимости ЭДС и напряжения на шинах генератора. При увеличении передаваемой мощности и угла дельта для поддержания напряжения на шинах генератора на требуемом уровне необходимо увеличивать ЭДС генератора.

Для сравнения кроме полученных характеристик с учетом коэффициента усиления представлены зависимости без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД.

Построим совмещенную угловую характеристику (рисунок 3).

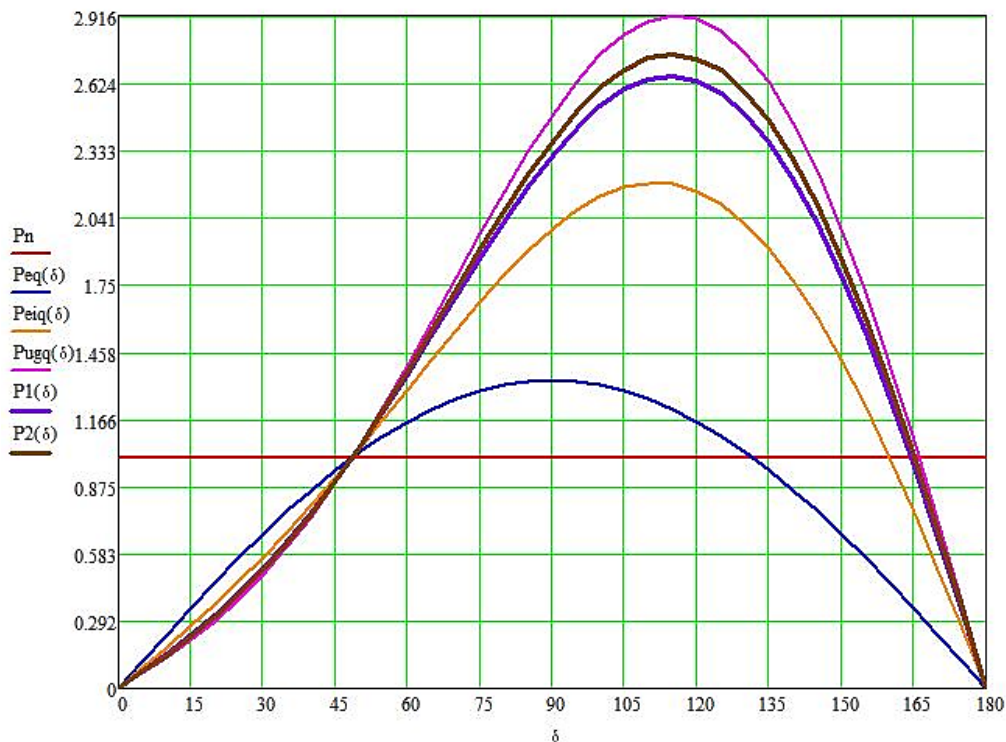


Рисунок 3 – Совмещенные угловые характеристики

Заключение

При анализе расчетов, было выявлено:

- при генераторе без АРВ предел передаваемой мощности равен $P_{\max} = 1,266$ при $\delta_n = 90^\circ$;
- при генераторе с АРВ ПД $P_{\max} = 2,1$, $\delta_n = 108,86^\circ$;
- при генераторе с АРВ СД $P_{\max} = 2,741$, $\delta_n = 117,21^\circ$;
- при коэффициенте усиления $K_U^{(1)} = 30$ $P_{\max} = 2,65$, $\delta_n = 117^\circ$;
- при коэффициенте усиления $K_U^{(2)} = 50$ $P_{\max} = 2,916$, $\delta_n = 117,45^\circ$;

Изменяя коэффициент усиления можно получить графики эквивалентные рассчитанным характеристикам без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД. Так при коэффициенте усиления $K_U^{(0)} = 0$ получаем характеристику без АРВ на генераторе.

Анализ устойчивости системы с автоматическим регулятором пропорционального типа показывает, что действие АРВ генератора позволяет увеличить пределы передаваемой мощности и расширить область статической устойчивости системы.

Литература

1. Гуревич, Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, А. А. Окин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
2. Винославский, В.Н. Переходные процессы в системах электроснабжения / В. Н. Винославский. – Киев : Выша школа, 1989. – 424 с.