

УДК 621.311.018 (575.2) (04)

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТАНЦИЯМИ

Т.А. Джунуев, М.Т. Абдылдаева

Рассмотрены условия устойчивости системы с двумя станциями соизмеримой мощности при представлении нагрузок постоянными сопротивлениями и статическими характеристиками.

Ключевые слова: система; станции; схема заземления; устойчивость.

В небольших электроэнергетических системах часто удобнее проводить все расчеты устойчивости применительно к эквивалентной схеме замещения, содержащей две параллельно работающие электростанции [1] (рисунок 1).

Для упрощения выкладок, но без ущерба для общности результатов, предположим, что все нагрузки системы представлены постоянными сопротивлениями. Замещение нагрузки постоянными сопротивлениями позволяет воспользоваться известными выражениями мощности станций через собственные и взаимные проводимости ветвей схемы:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) = P_{11} + P_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \\ P_2 &= E_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + E_1 E_2 \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}) = P_{22} - P_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ – относительный угол сдвига ЭДС (рисунок 1). Углы $\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{12}$ дополняют до 90° углы комплексных собственных и взаимных сопротивлений ветвей $Z_{11} = 1/Y_{11}$, $Z_{22} = 1/Y_{22}$, $Z_{12} = 1/Y_{12}$. Углы α_{11} и α_{22} обычно имеют небольшие положительные значения, а угол α_{12} – небольшое отрицательное значение. Графическое изображение этих зависимостей приведено на рисунке 2.

В эти напряжения приемника U в явном виде не входит, однако они учитывают его снижение при увеличении угла δ_{12} и поэтому максимум характеристики мощности первой станции P_{1m} представляет собой не что иное, как действительный предел мощности этой станции $P_{1мд}$ при нагрузке системы в виде постоянного сопротивления. Однако, как будет видно из дальнейшего, $P_{1мд}$ является пределом мощности, но не пределом устойчивости (рисунок 2).

Покажем, что устойчивая работа системы возможна и за действительным пределом мощности. Для этого составим дифференциальное уравнение, описывающее механическое движение роторов синхронных генераторов:

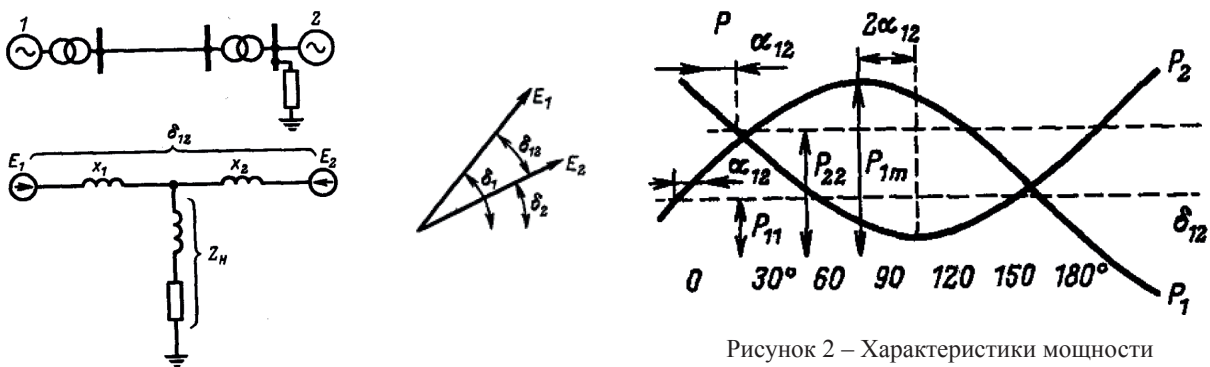


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема, схема замещения и векторная диаграмма ЭЭС

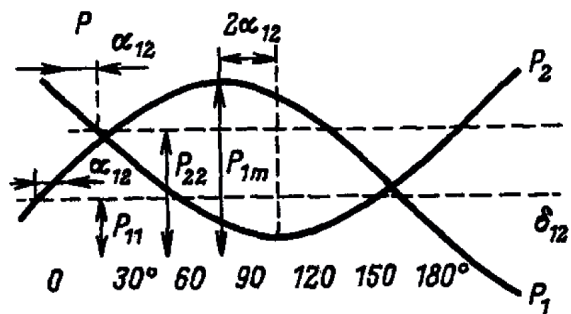


Рисунок 2 – Характеристики мощности электростанций

$$\left. \begin{aligned} T_{J3} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} &= \Delta P_1 = P_{10} - P_1 = P_{10} - P_{11} - P_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \\ T_{J2} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} &= \Delta P_2 = P_{20} - P_2 = P_{20} - P_{22} + P_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Правые части этих уравнений могут быть разложены в ряд Тейлора:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 &= P_{10} - P_{11} - P_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) = P_{10} - P_{11} - P_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) - \frac{dP_1}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} - \dots \\ \Delta P_2 &= P_{20} - P_{22} + P_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}) = P_{20} - P_{22} + P_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}) - \frac{dP_2}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} - \dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Отбрасывая в ряду Тейлора члены разложения высших порядков и, учитывая, что $P_{10} = P_{11} + P_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12})$, $P_{20} = P_{22} - P_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12})$, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 &\approx -\frac{dP_1}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} - \dots \\ \Delta P_2 &\approx -\frac{dP_2}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} - \dots \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Следовательно, система уравнений (2) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} T_{J1} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + \frac{dP_1}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} &= 0 \\ T_{J2} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + \frac{dP_2}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Разделив полученные уравнения на соответствующие значения постоянных инерции T_{J1}, T_{J2}, T_{JM} и вычтя второе уравнение из первого, получим:

$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_2}{d\delta_{12}} \right) \Delta\delta_{12} = 0, \quad (6)$$

где

$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = \frac{d^2(\delta_0 + \Delta\delta_{12})}{dt^2} = \frac{d^2 \Delta\delta_{12}}{dt^2}. \quad (7)$$

Подставляя это значение в уравнение (6) получим в окончательном виде уравнение малых колебаний, связывающих относительные узлы:

$$\frac{d^2 \Delta\delta_{12}}{dt^2} + \alpha_{21} \Delta\delta_{12} = 0, \quad (8)$$

где $\alpha_{21} = \frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_2}{d\delta_{12}}$ – удельное относительное ускорение роторов генераторов второй и первой электростанций.

Уравнение (8) определяет изменение относительного угла δ_{12} между ЭДС станций при малом возмущении режима работы. Это же уравнение определяет и изменение мощностей станций, так как в рассматриваемом случае мощность каждой станции зависит лишь от угла δ_{12} . Если полученная из уравнения (8) функция $\Delta\delta_{12} = f(t)$ нарастает, то система не устойчива, если же убывает, то система должна быть признана устойчивой.

Уравнение (6) аналогично уравнению (5), полученному для станции, работающей на шины бесконечной мощности, только вместо коэффициента $\frac{1}{T_J} \frac{dP}{d\delta}$ оно содержит коэффициент $\alpha_{21} = \frac{1}{T_J} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_J} \frac{dP_2}{d\delta_{12}}$.

Характеристическое уравнение имеет ту же структуру $p^2 + \alpha_{21} = 0$ и его корни равны $p_{12} = \pm j\sqrt{\alpha_{21}}$. Они также могут быть мнимые или вещественные. Если изменение угла $\alpha_{21} > 0$, то оба корня чисто мнимые и изменение угла $\Delta\delta_{12}$ подобно работе станции на шины бесконечной мощности приходит по закону

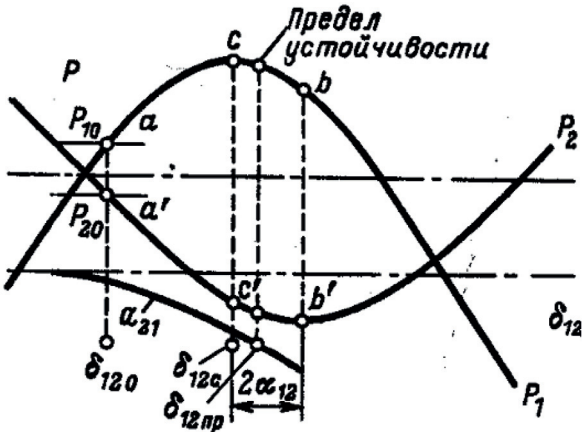


Рисунок 3 – Определение предела устойчивости по характеристикам мощности станций схемы

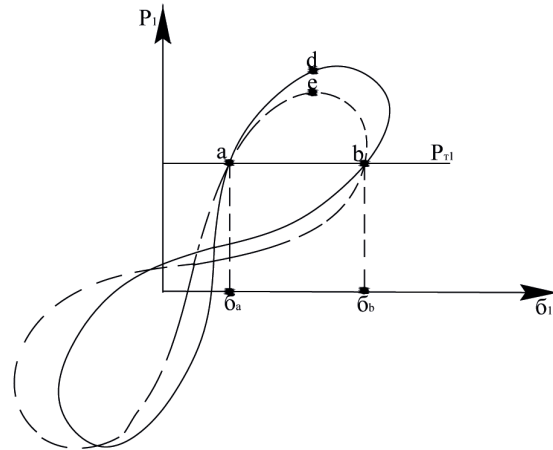


Рисунок 4 – Характеристики мощности генератора

незатухающих синусоидальных колебаний $\Delta\delta_{12} = C_{12} \sin(\omega t + \varphi)$. В реальных условиях, в которых существует рассеяние энергии, колебания затухают и, следовательно, система устойчива. Если же $\alpha_{21} < 0$, то корни различные вещественные, причем один из них всегда положителен. Относительный угол $\Delta\delta_{12}$ нарастает, и система должна быть признана неустойчивой. Таким образом, критерием устойчивости системы является условие $\alpha_{21} > 0$, которое позволяет установить, что на статическую устойчивость системы влияет новый фактор – постоянные инерции генераторов, хотя и в сравнительно узких пределах.

Физический смысл условия $\alpha_{21} > 0$ очень прост. Если угол δ_{21} получает небольшое приращение $\Delta\delta_{12}$, то мощности станций изменяются, и роторы генераторов получают ускорения:

$$\alpha_1 = \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = -\frac{1}{T_J} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} = a_1 \Delta\delta_{12}; \quad \alpha_2 = \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = -\frac{1}{T_J} \frac{dP_2}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} = a_2 \Delta\delta_{12}.$$

Эти ускорения определяют характер изменения абсолютных углов δ_1 и δ_2 . Разности удельных ускорений $a_{21} = a_2 - a_1$ или $a_{12} = a_1 - a_2$ представляют собой удельные ускорения второй электростанции относительно первой или наоборот. Они устанавливают характер изменения относительного угла δ_{12} $\frac{1}{\Delta\delta_{12}} \frac{d^2\Delta\delta_{12}}{dt^2} = a_{12} = -a_{21}$. Если $\alpha_{12} < 0$ или $\alpha_{21} > 0$, значит, угол δ_{12} уменьшается и система возвращается в исходное состояние, т.е. она устойчива. Если же $\alpha_{12} > 0$ или $\alpha_{21} < 0$, то угол δ_{12} нарастает и, следовательно, система неустойчива.

Продолжая анализ устойчивости системы обратимся к рисунку 3, на котором видно, что для режима, которому соответствует точка с (угол δ_{12}), где достигается действительный предел мощности удаленной станции 1, справедливы соотношения $dP_1/d\delta_{12} = 0$ и $dP_2/d\delta_{12} < 0$ и, следовательно, $\alpha_{21} < 0$, т.е. система устойчива при любых конечных значениях постоянных T_J (которые всегда положительны).

Система будет устойчивой и при значениях угла δ_{12} несколько больших δ_{12c} , хотя при этом действительный предел мощности одной из станций и будет уже пройден.

Для режима, которому отвечает точка b, где характеристика мощности имеет минимум, очевидно, $dP_1/d\delta_{12} < 0$ или $dP_2/d\delta_{12} = 0$ и система при любых значениях T_J оказывается неустойчивой.

Предел устойчивости системы лежит между максимумом одной и минимумом другой характеристики мощности, изменяясь в этих пределах в зависимости от соотношения между T_{J1} и T_{J2} . Таким образом, если для станции, работающей на шины бесконечной мощности, предел устойчивости совпадает с пределом мощности, то в случае двух (и более) станций предел устойчивости и предел мощности различны. Следует, однако, отметить, что разница между предельными режимами невелика, так как угол сдвига характеристик равен $2\alpha_{12}$, где α_{12} (дополнительный угол взаимного сопротивления) всегда невелик, поскольку в системе преобладают индуктивные сопротивления).

Если же активные сопротивления равны нулю, то значения углов δ_{12} , соответствующие максимуму P_1 и минимуму P_2 , совпадают и разница между пределами мощности и пределами устойчивости вообще исчезает.

При представлении нагрузки статическими характеристиками графики характеристик мощности генератора 1 при различных значениях мощности [2] P_2 приведены на рисунке 4. Отличительной особенностью

является то, что одному и тому же значению аргумента δ_1 соответствуют два значения функции P_1 , вызванные нелинейностью статических характеристик нагрузки. При этом налицо снижение предела передаваемой мощности $d > e$. Устойчивый режим системы возможен лишь при работе генератора 1 на одной верхней ветви adb или aeb характеристики мощности, точнее, на более крутой ее ветви.

Если помимо установления самого факта устойчивости системы в данном режиме поставить вопрос о запасе устойчивости (коэффициенте устойчивости) и определить его как отношение

$$k_3 = \frac{P - P_o}{P_o}, \quad (9)$$

то можно прийти к выводу, что расширение зоны устойчивости за пределами мощности не увеличивает значение мощности, которое можно передавать от удаленной станции и, следовательно, не увеличивает запаса.

Все это позволяет в практических расчетах во многих случаях отказаться от уточненного определения предела устойчивости и допустить, что он совпадает с пределом мощности, т.е. считать, что действительный предел мощности удаленной станции является одновременно и пределом устойчивости. Тогда вместо вычисления относительного ускорения α_{21} можно ограничиться вычислением синхронизирующей мощности удаленной станции $dP_1 / d\delta_{12}$. Характеристика мощности второй станции становится в этом случае несущественной.

Литература

1. *Веников В.А.* Электромеханические переходные процессы в электрических системах: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1978, 415 с.
2. *Жданов П.С.* Устойчивость электрических систем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. 400 с.