

К АНАЛИЗУ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ОСМОНАЛИЕВ К.Б.
izvestiya@ktu.aknet.kg

TO ANALIS OFUNSTEADY STABILITY OF ELECTRIC SYSTEM

OSMONALIEV K.B.
izvestiya@ktu.aknet.kg

В данной статье рассматриваются возможности выявления границ и анализ колебательной устойчивости при малых возмущениях.

In this article investigating the possibilities expose limits and analis of unsteady stability during some indigbftlies.

Введение. При решении эксплуатационных задач необходимо рассматривать возможности выявления границ колебательной устойчивости. Здесь наиболее важной задачей является учет ограничений, накладываемых на режимы электрической системы явлениями самораскачивания может иметь место при больших нагрузках синхронных машин при ослаблении связи с системой. В общем случае вероятность самораскачивания тем выше, чем дальше рассматриваемый режим работы синхронных машин.

Возможность выразить условия устойчивости в виде математических критериев зависит от порядка дифференциальных уравнений, описывающих движение системы, и от интенсивности возмущений.

При малых возмущениях уравнение, описывающее электрическую систему, можно упростить и преобразовать таким образом, чтобы оказалось возможным использование математических критериев устойчивости, известных из общей теории.

Цели и методы исследования. Анализ колебательной устойчивости может выполняться либо математическими методами, которые аналогичны исследованию корней характеристического уравнения (с вычислением самих корней или с применением критериев устойчивости), либо по результатам расчета переходного процесса при малом возмущении.

Вычисление корней характеристического уравнения позволяет достаточно глубоко исследовать характер свободных колебаний с определением собственных частот ω и коэффициентов затухания α .

Проверка возможности самораскачивания с помощью расчета переходного процесса, вызванного малым возмущением, дает меньшую точность, чем математические методы исследования корней, но имеет то преимущество, что могут быть использованы обычные стандартные программы для расчета устойчивости.

Осуществить полную проверку устойчивости с учетом возможности самораскачивания, необходимо определить знаки всех коэффициентов α_i в выражении, описывающем изменение параметра режима после малого возмущения.

После снятия малого возмущения изменение любого параметра режима (свободное движение системы) может быть описано выражением вида:

$$\Delta y(t) = \sum_{i=1}^m C_i e^{\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где Δy – отклонение параметра режима от положения равновесия, t – время; Если дифференциальные уравнения, описывающие все элементы исследуемой системы, известны, то определение вида зависимости $\Delta y(t)$ представляет собой чисто математическую проблему.

В максимально упрощенной форме решение рассматриваемой задачи сводится к ряду этапов, которые рассмотрим ниже на простейшей схеме (рис.1).

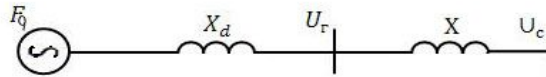


рис.1.

Мощность генератора в этой схеме определяется следующим уравнением:

$$P_{\Gamma} = P_{max} \sin \delta + K_{Д} \frac{d\delta}{dt}. \quad (2)$$

Переходным процессам здесь соответствует система уравнений:

$$\tau_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - P_{\Gamma} \quad (3)$$

$$S = \frac{d\delta}{dt}; \quad (4)$$

$$P_{\Gamma} = P_{max} \sin \delta + K_{Д} S; \quad (5)$$

где τ_j – механическая постоянная инерции генератора вместе с турбиной. Переменными параметрами здесь являются δ , скольжение S и активная мощность генератора P_{Γ} . В результате кратковременного возмущения эти параметры отклоняются от исходных значений $\delta_0, s_0 = 0, P_{\Gamma 0} = P_T$, соответствующих состоянию равновесия.

Рассмотрим этапы, характеризующие последовательность решения задачи.

1. Анализ устойчивости: линеаризация уравнений в точке рассматриваемого режима и замена исходных переменных их отклонениями от положения равновесия.

Линеаризация состоит в том, что все нелинейные зависимости между переменными заменяются в малой окрестности положения равновесия на линейные. Без линеаризации получение решения дифференциальных уравнений, описывающих электрическую систему, в аналитическом виде (1) невозможно. Для линеаризации уравнений осуществляется замена переменных: в место каждого параметра режима y вводится $y_0 + \Delta y$, где y_0 – значение этого параметра в заданном режиме, Δy – приращение.

Полученные таким образом уравнения упрощаются с учетом того, что все Δy малы.

В случае уравнений (3) – (5) выполняется замена $\delta = \delta_0 + \Delta \delta, s = s_0 + \Delta s = \Delta s, P_{\Gamma} = P_{\Gamma 0} + \Delta P_{\Gamma}$;

Очевидно, что

$$\frac{d}{dt}(\delta_0 + \Delta \delta) = \frac{d\Delta \delta}{dt}, P_{\Gamma} = P_{\Gamma 0} = P_{max} \sin \delta_0;$$

поэтому имеем

$$\begin{cases} \tau_j \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = -\Delta P_{\Gamma}; \\ \Delta S = \frac{d\Delta \delta}{dt}; \\ \Delta P_{\Gamma} = P_{max} \cos \delta_0 \Delta \delta + K_{\delta} \Delta S. \end{cases}$$

2. Приведение системы линеаризованных уравнений к одному уравнению путем исключения всех переменных, кроме одного, любого.

Если исключить, например, переменные ΔP_{max} и ΔS , то получим

$$\tau_j \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + K_D \frac{d \Delta \delta}{dt} + P_{max} (\cos \delta_0) \Delta \delta = 0. \quad (6)$$

Это есть дифференциальное уравнение, описывающее рассматриваемую электрическую систему при малых отклонениях от положения равновесия. Такому положению соответствует условие $\delta = \delta_0$, т.е. $\Delta \delta = 0$, при этом (6) обращается в тождество.

3. Применение операторного метода решения дифференциальных уравнений.

По этому методу осуществляется переход от дифференциального уравнения, содержащего производные переменной величины по времени, к эквивалентному уравнению в операторной форме. Для уравнений, где переменной служит отклонение $\Delta \delta$ от положения равновесия, переход к операторной форме сводится к замене d/dt на ρ , d^2/dt^2 на ρ^2 и т.д., где ρ – оператор. Полученное уравнение рассматривается как алгебраическое уравнение относительно ρ .

Тогда из (6) следует

$$\tau_j \rho^2 \Delta \delta + K_D \rho \Delta \delta + \rho_{max} \cos \delta_0 \Delta \delta = 0$$

или, поскольку ρ является алгебраическим множителем,

$$(\tau_j \rho^2 + K_D \rho + \rho_{max} \cos \delta_0) \Delta \delta = 0$$

Так как при колебании устойчивости, когда $\Delta \delta \neq 0$, то

$$\tau_j \rho^2 + K_D \rho + \rho_{max} \cos \delta_0 = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) не зависит от того, какая из переменных величин использовалась при его получении. При более сложной системе исходных дифференциальных уравнений повышается степень относительно ρ : и характеристическое уравнение имеет вид:

$$a_1 \rho^2 + a_1 \rho^{n-1} + a_2 \rho^{n-2} + \dots + a_{n-1} \rho + a_n = 0. \quad (8)$$

Из характеристического уравнения (8) следует, что все его весовые коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_n определяются параметрами исследуемой электрической системы и ее режима и являются действительными числами.

4. Решение алгебраического уравнения (8) относительно ρ .

Искомые значения α_j , из уравнения (1) определяются как действительные части корней ρ_j ($j=1, 2, \dots, n$) характеристического уравнения.

Корни могут быть действительными: $\rho = \alpha$, тогда каждому из них соответствует составляющая вида

$$C_i e^{\alpha i t} \text{ – аperiodическая составляющая,} \quad (9)$$

или комплексно-сопряженными: $\rho = \alpha + j\omega$ и $\rho = \alpha - j\omega$, тогда каждой паре таких корней соответствует составляющая вида

$$C_j e^{\alpha i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i) \text{ – колебательная составляющая.} \quad (10)$$

После того, как найдены все корни характеристического уравнения и определены знаки α_i , задача проверки устойчивости системы оказывается решенной.

В случае если электрическая система устойчива (все $\alpha_i > 0$), это означает, что она имеет все «левые» корни. Действительные и комплексно-сопряженные корни, где $\alpha_i > 0$, называются «правыми», что соответствует отображению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости (рис. 2).

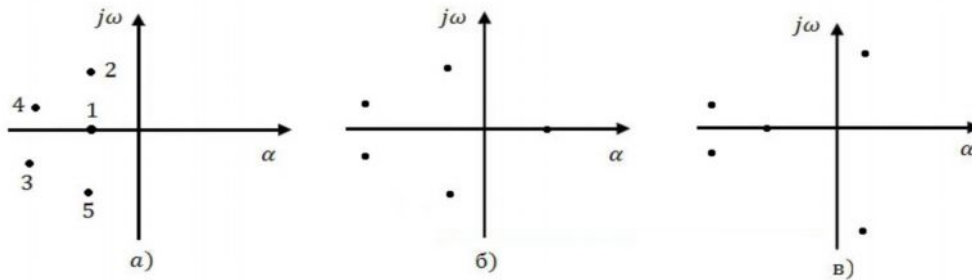


рис. 2

а – система устойчива; б – апериодическая неустойчивость; в – колебательная неустойчивость.

Уравнение (7) относительно ρ является квадратным, и его корни имеют вид:

$$\rho_{1,2} = \frac{K_D \pm \sqrt{K_D^2 - 4\tau_j \rho_{max} \cos \delta_0}}{2\tau_j} \quad (11)$$

Зависимость от того, какой режим рассматривается, т.е. каково значение δ_0 , возможны три случая: (графически они отображены на рис. 3а, 3б, 3в).

1. Если подкоренное выражение положительно, но меньше, чем K_D^2 , то оба корня действительны и отрицательны: $\alpha_1 < 0$ и $\alpha_2 < 0$, т.е. система устойчива и возвращается к положению равновесия апериодически, по закону суммы двух экспонент (9), показанных на рис. 3а, где имеет место при $(\delta_0) < 90^\circ$ и очень большом коэффициенте демпфирования;

2. Если подкоренное выражение в (11) отрицательно, то корни комплексно-сопряженные, $\alpha < 0$, система устойчива, а затухающие колебания $\Delta\delta$ соответствуют рис.3б. Здесь $(\delta_0) < 90^\circ$, а коэффициент демпфирования имеет достаточно малое значение.

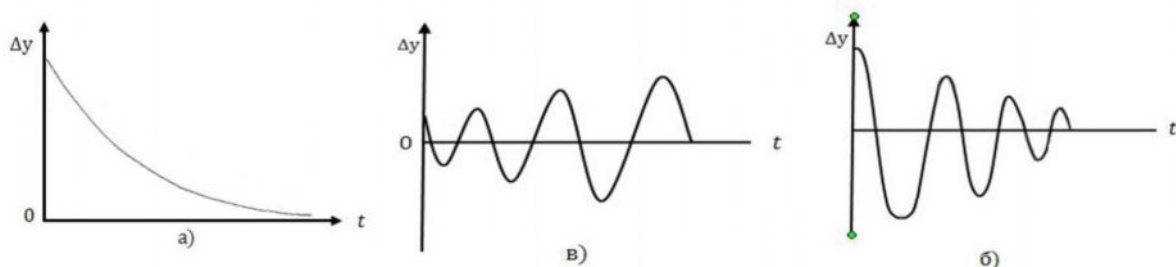


рис.3.

3. Если подкоренное выражение в (11) положительно и больше, чем K_D^2 , то корни действительны, причем $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$. Система неустойчива, отклонение угла нарастает апериодически, без колебаний;

Колебательной неустойчивости рассматриваемой электрической системы соответствует $K_D < 0$, (рис. 3в).

Выводы. Отметим, что синхронные и асинхронные машины с большими механическими постоянными инерции могут заметно повлиять на колебательные свойства системы.

Вблизи генераторов, колебательная устойчивость которых проверяется, создается небольшое возмущение – такое, чтобы наибольшие изменения углов δ составляли $10-30^\circ$, и проверяется, нет ли в числе гармонических составляющих переходного процесса составляющей, амплитуда которой нарастает. Это свидетельствовало бы о колебательной неустойчивости.

Погрешности такого анализа самораскачивания связаны с тем, что начальное возмущение, если оно велико, приводит к неточной оценке границы колебательной устойчивости, так как скажутся нелинейности уравнений электрической системы. Если же начальное возмущение слишком мало, то отклонения некоторых параметров от среднего уровня будут вычислены с большими погрешностями.

Точность оценки колебательной устойчивости повышается, если программно осуществляется разложение колебаний параметров режима на составляющие с вычислением декрементов затухания.

Литература

1. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: Учебник для вузов / под ред. В.А. Веникова. М.: Высшая школа, 1981 г.
2. В.А. Веников. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учебник для вузов М.: Высшая школа, 1985 г.
3. И.В. Литкенс, В.И. Пуго. Колебательные свойства электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1988 г.