

Об анализе условий достижения предела по апериодической устойчивости электроэнергетической системы

ЛЕГКОКОНЕЦ П.В.

Проведен анализ возможности обобщения критерия достижения предела по апериодической устойчивости простейшей электроэнергетической системы (ЭЭС) на случай сложных ЭЭС. Для ЭЭС, у которых можно пренебречь потерями активной мощности в ветвях, доказано существование апериодически устойчивых режимов с углом по какой-либо из ветвей, превышающим 90° . Показано, что в отличие от простейшей ЭЭС для сложных ЭЭС нельзя использовать достижение максимума угловой характеристики какой-либо из ветвей ЭЭС в качестве критерия достижения предела по апериодической устойчивости.

Ключевые слова: энергосистема, апериодическая устойчивость, угловая характеристика, утяжеление

Как известно, зависимость перетока активной мощности по ветви от разности углов напряжений по концам ветви (угловая характеристика) имеет вид синусоиды:

$$P_{ij} = U_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + U_i U_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}),$$

где U_i , δ_i , U_j , δ_j — модули и углы напряжений по концам ветви; y_{ii} , α_{ii} , y_{ij} , α_{ij}

— модули и дополнения до -90° углов собственных и взаимных проводимостей ветви.

В теории статической устойчивости ЭЭС доказывается, что для простейшей ЭЭС ($U_\Gamma = \text{const}$) — электропередача — «шины бесконечной мощности» предел по апериодической статической устойчивости соответствует максимуму угловой характеристики по электропередаче, а все режимы с $dP/d\delta < 0$ являются неустойчивыми.

Возникает закономерный вопрос о возможности обобщения указанного критерия на случай сложных ЭЭС: можно ли по достижению максимума угловой характеристики какой-либо из ветвей ЭЭС судить о достижении предела по апериодической устойчивости ЭЭС (или в аналитическом виде: «если для какой-либо из ветвей ЭЭС $dP_{ij}/d\delta_{ij} < 0$, то соответствующий режим неустойчив»).

Для систем, в которых можно пренебречь потерями активной мощности, предполагаемый критерий выражается следующим простым образом: «если по какой-либо из ветвей угол превышает 90° , то соответствующий установившийся режим ЭЭС является неустойчивым».

Проведенный анализ режимов и устойчивости конкретной двухмашинной ЭЭС показывает, что

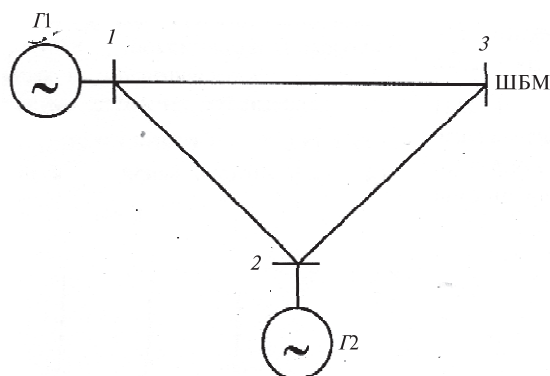


Рис. 1. Схема трёхузловой ЭЭС

предполагаемое обобщение критерия достижения предела по статической устойчивости простейшей ЭЭС на случай сложных ЭЭС несправедливо.

Рассмотрим трёхузловую схему на рис. 1.

Для генераторов, подключенных к узлам 1 и 2, задано $U_\Gamma = \text{const}$. Узел 3 является шиной бесконечной мощности.

Для упрощения записи уравнений установившегося режима ветви 1-2, 1-3 и 2-3 заданы индуктивностями, и их активные сопротивления приняты равными 0. Уравнения в этом случае записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_1 U_2 y_{12} \sin(\delta_1 - \delta_2) + U_1 U_3 y_{13} \sin(\delta_1 - \delta_3) &= P_{\Gamma 1}; \\ U_2 U_1 y_{21} \sin(\delta_2 - \delta_1) + U_2 U_3 y_{23} \sin(\delta_2 - \delta_3) &= P_{\Gamma 2}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Для системы уравнений (1) выполнены условия¹, при которых знак якобиана системы уравнений установившегося режима ЭЭС совпадает со

¹ Идельчик В.И. Расчёты установившихся режимов электрических систем. — М.: Энергия, 1977.

знаком свободного члена характеристического уравнения ЭЭС. В связи с этим по изменению знака якобиана системы уравнений (1) можно судить о нарушении аperiodической устойчивости рассматриваемой ЭЭС.

Примем (в отн. ед.): $U_1 = U_2 = U_3 = 1$; $y_{12} = y_{13} = y_{23} = 1$.

В качестве исходных значений активной мощности генераторов 1 и 2 примем следующие значения: $P_{Г1} = 0,5$; $P_{Г2} = 0,2$.

Решение системы уравнений установившегося режима ЭЭС показывает, что таким значениям соответствуют два режима:

$$\delta_1 = 23,45^\circ, \delta_2 = 17,58^\circ, |\partial W / \partial \delta| = 2,735$$

и

$$\delta_1 = 167,55^\circ, \delta_2 = 151,03^\circ, |\partial W / \partial \delta| = -0,921,$$

где $|\partial W / \partial \delta|$ – якобианы системы уравнений (1) для указанных режимов.

Якобианы, соответствующие указанным решениям, имеют разные знаки, т.е. один из указанных режимов является аperiodически устойчивым, а второй – нет. Из физических соображений ясно, что аperiodически устойчивым является режим с $\delta_1 = 23,45^\circ, \delta_2 = 17,58^\circ$.

Этот режим утяжеляется при постепенном увеличении мощности генератора 1. Предельным по утяжелению режимом является режим с

$$P_{Г1} = 1,6488, \delta_1 = 106,22^\circ, \delta_2 = 62,69^\circ.$$

График изменения якобиана при утяжелении режима и угловые характеристики активной мощности для ветвей схемы $P_{ij} = f(\delta_{ij})$ в диапазоне траектории утяжеления режима приведены на рис. 2 и 3.

Якобиан при утяжелении режима не меняет знак, т.е. аperiodическая устойчивость рассматриваемой ЭЭС при утяжелении не нарушается, соот-

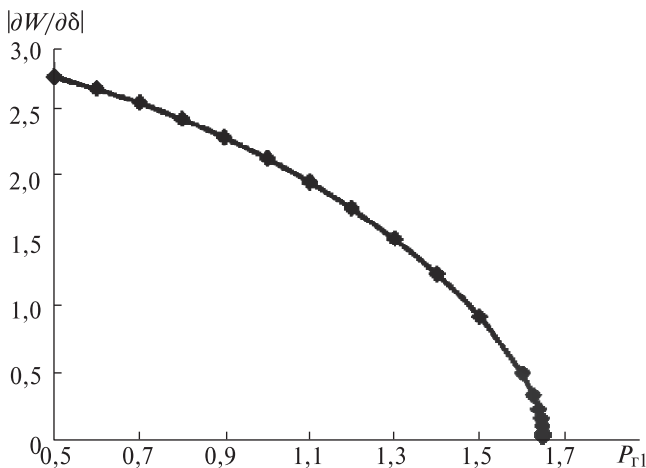


Рис. 2. График изменения якобиана при утяжелении режима

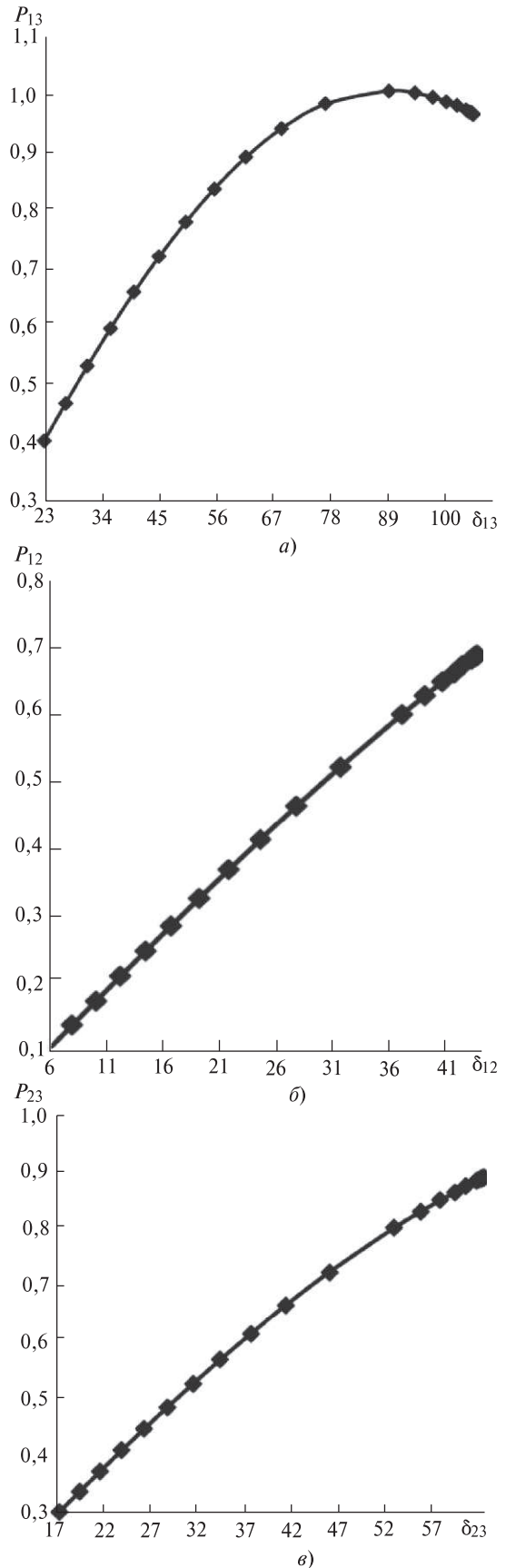


Рис. 3. Угловая характеристика активной мощности: а – для ветви 1–3 в диапазоне траектории утяжеления режима $P_{13} = f(\delta_{13})$; б – для ветви 1–2 в диапазоне траектории утяжеления режима $P_{12} = f(\delta_{12})$; в – для ветви 2–3 в диапазоне траектории утяжеления режима $P_{23} = f(\delta_{23})$

ветственно близкие к предельному по утяжелению режимы являются аperiodически устойчивыми. При этом в предельном по утяжелению режиме угол по ветви 1–3 равен $106,22^\circ$, т.е. превышает 90° . Физически существование аperiodически устойчивых режимов с углом по ветви, активное сопротивление которой равно 0, превышающим 90° , оказывается достаточно неожиданным. В целом же полученный результат означает, что по достижении максимума угловой характеристики какой-либо из ветвей сложной ЭЭС нельзя судить о достижении предела по аperiodической устойчивости.

Выводы. 1. Для ЭЭС, у которых можно пренебречь потерями активной мощности в ветвях, доказано существование аperiodически устойчивых ре-

жимов с углом по какой-либо из ветвей, превышающим 90° .

2. В отличие от простейшей ЭЭС для сложных ЭЭС нельзя использовать достижение максимума угловой характеристики какой-либо из ветвей ЭЭС в качестве критерия достижения предела по аperiodической устойчивости.

Автор: Легкоконец Павел Владимирович окончил в 2000 г. электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ). В 2003 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методов и алгоритмов расчёта статической устойчивости электроэнергетических систем с гибкими электропередачами». Начальник отдела АО «СО ЕЭС».

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 11, pp. 55–57.

On Analyzing the Conditions of Reaching the Power System Aperiodic Stability Limit

LEGKOKONETS Pavel Vladimirovich (PC «System Operator of the United Power System», Moscow, Russia) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

The possibility of generalizing the criterion of reaching the aperiodic stability limit in an electric power system (EPS) with the simplest configuration for the case of complex EPSs is analyzed. It is demonstrated that aperiodically stable modes may exist in an EPS having a branch the power angle across which exceeds 90° provided that the active power losses in its branches may be neglected. It is shown that, unlike an EPS with the simplest configuration, reaching of the maximum on the power angle characteristic in any of branches in a complex EPS cannot be used as the criterion for achieving the aperiodic stability limit.

Key words: power system, aperiodic stability, power angle characteristic, aggravating