

Магистрант ЭФ А.К.Давиров,
науч. рук., Акад. Т.Х.Насиров, ТашГТУ

КРИТЕРИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Maqolada barqarorlashgan xolatning mavjudlik kriteriyasi ko'rib chiqiladi. Barqarorlashgan xolatning elektr tizimdagi quvvat isrofining xosilasiga bog'liq bo'lgan nochiziqli tenglamalar sistemasi keltirilgan bo'lib, keltirilgan tugun tenglamalari sistemasi bir nechta yechimga ega bo'lishi yoki birortaxam yechimga ega bo'lmasligi mumkinnochiziqli tugun tenglamasi, bir nechta yechimga ega bo'lishi yoki yechimga ega bo'lmasligi mumkin.

Ko'rsatilgan: Elektr tizimning janubiy-g'arbiy qismining ekvivalent sxemasi keltirilgan bo'lib, 12-tugun uchun elektr tizimning barqarorlashgan xolati xisoblash natijalari keltirilgan. Elektr tizimning quyidagi qiymat bilan aniqlanadigan quvvat bo'yich chegaraviy normal xolati o'rnatilgan $\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Pi_i} = \infty$.

В статье рассматриваются критерии существования установившихся режимов энергосистем. Представлены нелинейные узловы уравнения установившихся режимов, имеющие множество решений или не иметь ни одного физически реализуемого решения. Приведены критерии существования решений, основанных на производных потерь мощности в зависимости от параметров режимов энергосистемы.

Показаны: эквивалентная схема электрической системы Юго-Западных МЭС; результаты расчетов установившихся режимов электрической системы при утяжеленных значениях узла 12. Установлены предельные нормальные режимы электрических систем по мощности узлов, определенные по критерию $\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Pi_i} = \infty$.

In paper criteria of existence of the installed regimes of power supply systems are observed. The nonlinear central equations of the installed regimes having assemblage of solutions or not to have of any physically implemented solution are presented. Criteria of existence of the solutions based on derivatives of power losses depending on parameters of regimes of a power supply system are resulted.

Are shown: the equivalent circuit design of electric system Southwest МЭС; results of calculations of the installed regimes of electric system at the charged values of knot 12. Limiting normal regimes of electric systems on the powers of knots defined on criterion are installed

$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Pi_i} = \infty$.

Система уравнений установившегося режима электрической системы вследствие нелинейности относительно искомых переменных формально может, иметь множество решений или не иметь ни одного физически реализуемого решения. Поскольку в общем случае решение нелинейных узловых уравнений (УУ) для сложной электрической системы может быть получено только итерационным путем, то требуется решение задачи о взаимосвязи сходимости процесса и существовании решения. Действительно, если при расчете определенного режима итерационный процесс не сходится, то решение иногда удается получить, улучшив начальное приближение, корректируя ход процесса (используя ускоряющие коэффициенты, введение дополнительного параметра и др.) или же применяя другой метод. Возникает также проблема устойчивости полученного решения [1-2]. Таким

образом, требуется решение задачи взаимосвязи свойств нелинейных уравнений и реальных режимов, т.е. адекватности свойств установившегося режима реальной ЭЭС и принятой его математической модели.

Определение установившегося режима, предельного по какому-либо его параметру (мощности или модулю напряжения отдельных узлов, перетоку мощности и др.) является часто встречающейся на практике задачей. В общем случае эта задача может быть решена через серии расчетов установившихся режимов при их «утяжелениях». При этом варианты и траектории утяжеления режима от исходного до предельного определяются характером решаемой задачи.

Предел по сходимости итерационного процесса при утяжелении соответствует предельному режиму лишь при допущении о сходимости применяемого алгоритма к физически реализуемым решениям в односвязной области, содержащей исходный и предельный режимы. Поскольку потеря сходимости итерационного процесса не может без дополнительных условий служить критерием неосуществимости предполагаемого режима, то необходимо иметь другой, физически обоснованный критерий. Наиболее подходящей системной функцией для формулировки критерия предельности режима является функция суммарных потерь мощности, зависящая от всех параметров режима ЭЭС.

На основе расчетно-экспериментальных исследований установлено следующее положение: установившийся режим является предельным по отклонению какого-либо независимого параметра $\Pi_i \in P_i, Q_i$, если малые изменения этого параметра вызывают неограниченно большие изменения суммарных потерь активной мощности в системе.

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Pi_i} \rightarrow \infty \Leftrightarrow \Pi_i \rightarrow \Pi_{i\text{пр}} \quad (1)$$

Поскольку зависимость потерь активной мощности от режимных параметров в явном виде выражается через матрицу узловых сопротивлений, то выражение (1) получим через якобиан УУ в форме.

$$\Delta S_c = -\hat{I}_0 U_0 - \sum_{i=1}^N S_i = (\hat{Y}_0 U_0 - \hat{B}\hat{I}) U_0 - \sum_{i=1}^N S_i \quad (2)$$

Из (2) для активной составляющей потерь имеем

$$\Delta P_c = g_0 U_0^2 + U_0 \sum_{i=1}^N [B \odot_i (P_i U'_i + Q_i U''_i) - B''_i (P_i U''_i - Q_i U'_i)] / U_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

Выражение частной производной функции ΔP_c по независимой переменной $\Pi_i \in P_i, Q_i$ имеет вид

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Pi_i} = \frac{\partial \bar{\Delta P}_c}{\partial \Pi_i} + \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial \Delta P_c}{\partial U'_k} \cdot \frac{\partial U'_k}{\partial \Pi_i} + \frac{\partial \Delta P_c}{\partial U''_k} \cdot \frac{\partial U''_k}{\partial \Pi_i} \right) \quad (4)$$

где

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial U'_k} = \frac{U_0}{U_k^4} \left\{ B'_k \left[P_k (U_k''^2 - U_k'^2) - 2Q_k U'_k U''_k \right] + B''_k \left[Q_k (U_k''^2 - U_k'^2) + 2P_k U'_k U''_k \right] \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial U''_k} = \frac{U_0}{U_k^4} \left\{ B'_k \left[Q_k (U_k'^2 - U_k''^2) - 2P_k U'_k U''_k \right] - B''_k \left[P_k (U_k'^2 - U_k''^2) + 2Q_k U'_k U''_k \right] \right\} \quad (6)$$

Выражения частных производных $\frac{\partial U'_k}{\partial \Pi_i}$ и $\frac{\partial U''_k}{\partial \Pi_i}$ получим из системы УУ записав их в форме баланса напряжений в матричном виде:

$$\begin{vmatrix} W'(U) \\ W''(U) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U' \\ U'' \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} A' \\ A'' \end{vmatrix} U_0 - \begin{vmatrix} \text{Re}(Z\hat{S}) & -\text{Im}(Z\hat{S}) \\ \text{Im}(Z\hat{S}) & \text{Re}(Z\hat{S}) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} (U'_i/U_i^2) \\ (U''_i/U_i^2) \end{vmatrix} \quad (7)$$

где $\text{Re}(Z\hat{S})$, $\text{Im}(Z\hat{S})$ - квадратные матрицы порядка $2N$, элементами которых являются

$$\text{Re}(Z\hat{S}) = R_{ik}P_k + X_{ik}Q_k, \quad \text{Im}(Z\hat{S}) = X_{ik}P_k - R_{ik}Q_k.$$

Дифференцируя систему неявно заданных функций $2N$ зависимых переменных (7) по некоторой независимой переменной $\Pi_i \in P_i, Q_i$, имеем

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial W'}{\partial U'} & \frac{\partial W'}{\partial U''} \\ \frac{\partial W''}{\partial U'} & \frac{\partial W''}{\partial U''} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \frac{\partial U'}{\partial \Pi_i} \\ \frac{\partial U''}{\partial \Pi_i} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \frac{\partial W'}{\partial \Pi_i} \\ \frac{\partial W''}{\partial \Pi_i} \end{vmatrix} \quad (8)$$

Тогда матрица-столбец искомых частных производных определится как

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial U'}{\partial \Pi_i} \\ \frac{\partial U''}{\partial \Pi_i} \end{vmatrix} = -[J(U)]^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \frac{\partial W'}{\partial \Pi_i} \\ \frac{\partial W''}{\partial \Pi_i} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где якобиан УУ в форме баланса напряжений

$$J(U) = \begin{vmatrix} \frac{\partial W'}{\partial U'} & \frac{\partial W'}{\partial U''} \\ \frac{\partial W''}{\partial U'} & \frac{\partial W''}{\partial U''} \end{vmatrix} \quad (10)$$

получается дифференцированием уравнений (7). Находим их поэлементно ($k \neq i$):

$$\begin{aligned} \frac{\partial W'_i}{\partial U'_k} &= [\text{Re}(Z_{ik}\hat{S}_k)(U_k'^2 - U_k''^2) + 2\text{Im}(Z_{ik}\hat{S}_k)U'_k U_k''] / U_k^4, \\ \frac{\partial W'_i}{\partial U''_k} &= -[\text{Re}(Z_{ik}\hat{S}_k)2U'_k U_k'' + \text{Im}(Z_{ik}\hat{S}_k)(U_k'^2 - U_k''^2)] / U_k^4, \\ \frac{\partial W''_i}{\partial U'_k} &= [-\text{Re}(Z_{ik}\hat{S}_k)2U'_k U_k'' + \text{Im}(Z_{ik}\hat{S}_k)(U_k'^2 - U_k''^2)] / U_k^4, \\ \frac{\partial W''_i}{\partial U''_k} &= [\text{Re}(Z_{ik}\hat{S}_k)(U_k'^2 - U_k''^2) - 2\text{Im}(Z_{ik}\hat{S}_k)U'_k U_k''] / U_k^4, \end{aligned} \quad (11)$$

Причем

$$\frac{\partial W'_i}{\partial U'_i} = 1 + [\operatorname{Re}(Z_{ii}\hat{S}_i)(U'^2_i - U''^2_i) + 2\operatorname{Im}(Z_{ii}\hat{S}_i)U'_i U''_i] / U_i^4 \quad (12)$$

Из (4) и (9) получим выражение производной от функции потерь активной мощности через якобиан УУ в форме баланса напряжений:

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Pi_i} = \frac{\partial \bar{\Delta P}_c}{\partial \Pi_i} - \left[\frac{\partial \Delta P_c}{\partial U'}, \frac{\partial \Delta P_c}{\partial U''} \right] \cdot [J(U)]^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \frac{\partial W'}{\partial \Pi_i} \\ \frac{\partial W''}{\partial \Pi_i} \end{vmatrix} \quad (13)$$

Ниже представлены производные, входящие в эту формулу в зависимости от переменной $\Pi_i \in P_i, Q_i$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_c}{\partial P_i} &= \frac{U_0}{U_i^2} (B'_i U'_i - B''_i U''_i) - 1, \\ \frac{\partial \Delta P_c}{\partial Q_i} &= \frac{U_0}{U_i^2} (B'_i U''_i + B''_i U'_i) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W'_i}{\partial P_k} &= \frac{1}{U_k^2} (R_{ik} U'_k - X_{ik} U''_k), & \frac{\partial W''_i}{\partial P_k} &= \frac{1}{U_k^2} (X_{ik} U'_k + R_{ik} U''_k), \\ \frac{\partial W'_i}{\partial Q_k} &= \frac{1}{U_k^2} (X_{ik} U'_k + R_{ik} U''_k), & \frac{\partial W''_i}{\partial Q_k} &= \frac{1}{U_k^2} (-R_{ik} U'_k + X_{ik} U''_k). \end{aligned} \quad (15)$$

Условием существования производной $\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Pi_i}$ по (13) будет.

$$\det[J(U)] \neq 0 \quad (16)$$

Если в точке решения якобиан УУ равен нулю, то из (13) следует $\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Pi_i} = \infty$.

Таким образом, предел по существованию решений нелинейных УУ соответствует предельному режиму, определяемому критерием (1). Иными словами, если система УУ при определенных значениях независимых параметров имеет решение и в точке решения якобиан отличен от нуля, то и при малом изменении параметров система будет иметь вполне определенное решение. Если же в точке решения якобиан УУ равен или близок к нулю, то незначительное изменение параметров в направлении утяжеления режима обусловит отсутствие реального решения УУ.

Сформулированные критерии существования и предельности установившегося режима справедливы и для якобианов УУ, записанных в форме баланса токов или баланса мощностей.

Исходными данными являются:

Исследования выполнялись на примере, электрической системы, схема которой представлена на рис.1. Утяжеление осуществлялось по активной мощности узла 12.

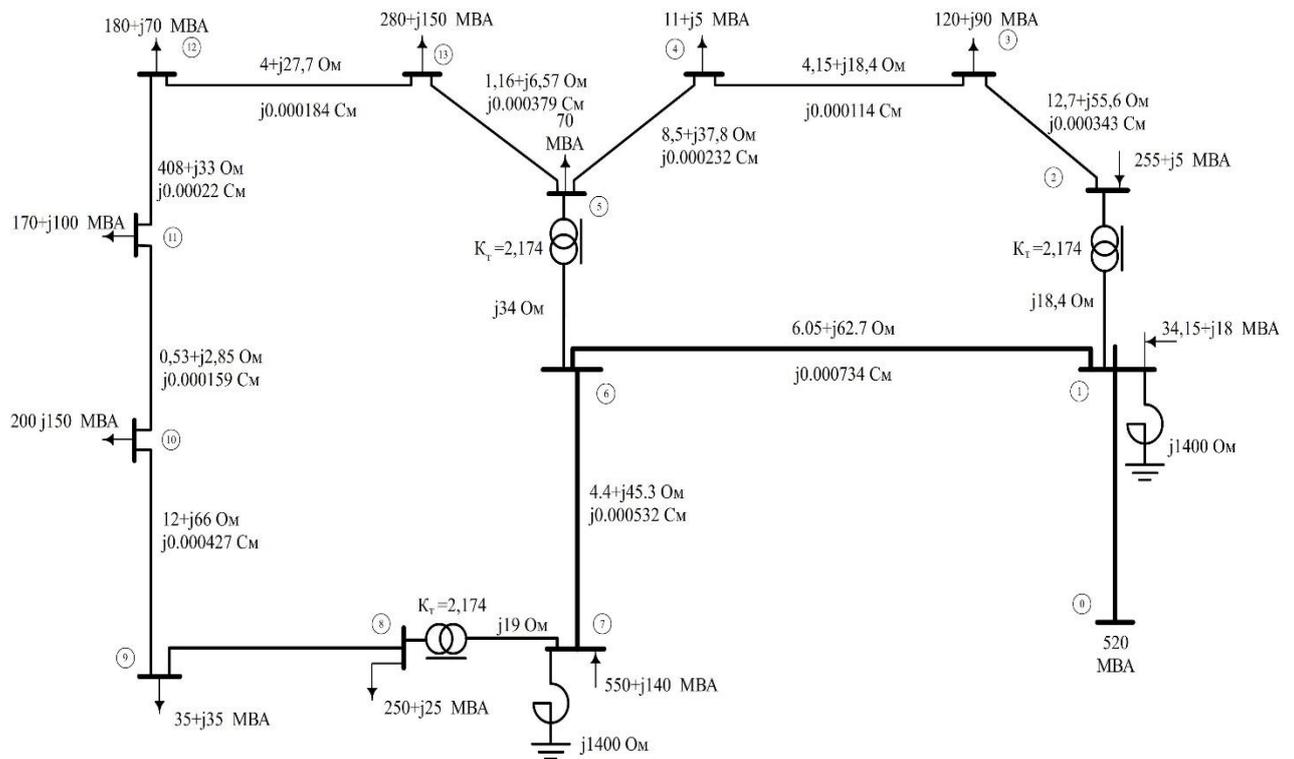


Рис.1. Эквивалентная схема электрической системы Юго-Западных МЭС

Результаты расчетов установившихся режимов электрической системы при утяжеленных значениях мощности узла 12 приведены в таблица 1. (ΔP_c ΔQ_c – суммарные потери активной и реактивной мощности; U_{12} – модуль напряжения узла 12)

Таблица 1

P_{12}	ΔP_c	ΔQ_c	U
180	15,706	147,268	215,141
230	20,362	187,478	208,188
280	27,139	245,826	198,534
330	38,705	345,698	182,500
340	42,631	379,795	177,082
341	43,100	383,873	176,435
342	43,588	388,125	175,760
343	44,098	392,571	175,054
344	44,634	397,236	174,314
345	45,198	402,152	173,534
346	45,795	407,361	172,708
347	46,431	412,914	171,827
348	47,114	418,883	170,881

На рис.2 приведен график зависимости суммарных потерь активной мощности в системе нагрузки узла 12 при утяжелении.

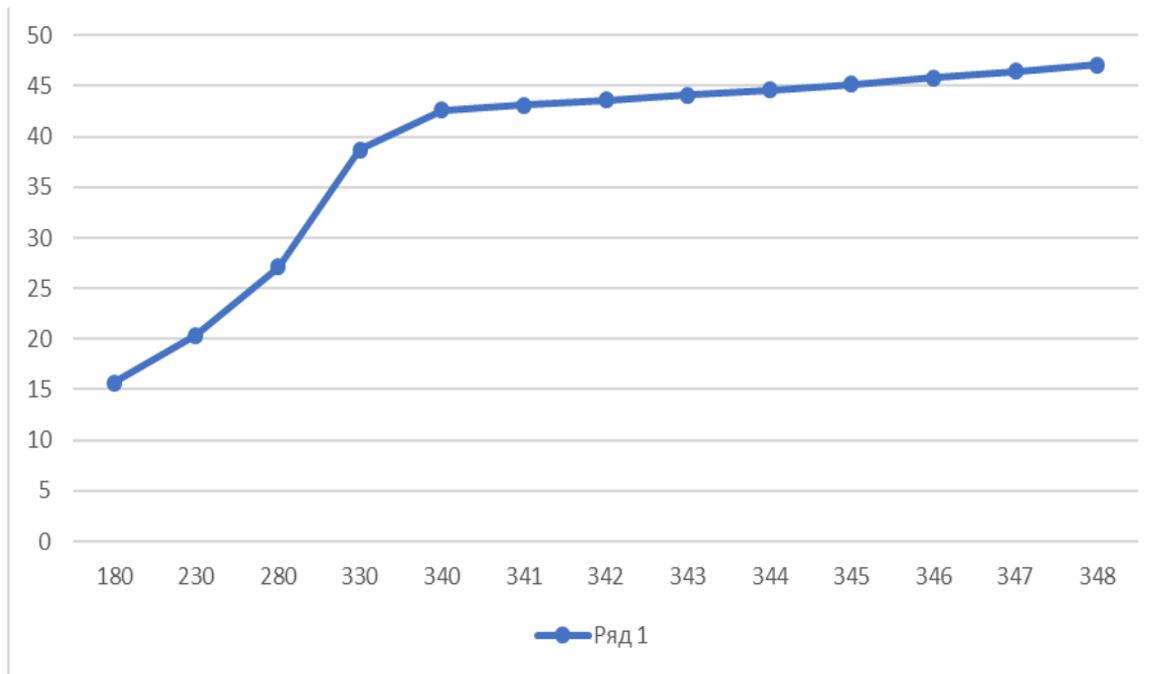


Рис. 2. График зависимости суммарных потерь активной мощности в системе нагрузки узла 12 при утяжелении в виде ряда 1

Как видно из графика на рис.2 предельный режим наступает при $P_{12} = 348 \text{ МВт}$, после которого итерационный процесс расходится. Решения, получаемые после $P_{12} > 350 \text{ МВт}$, являются физически нереализуемыми, так как они не отвечают критерию $\frac{\partial \pi}{\partial P_i} > 0$.

Таким образом, предельные нормальные режимы электрических систем по мощности узлов могут быть определены по критерию $\frac{\partial \Delta P_c}{\partial P_i} = \infty$.

Литература

1. Насиров Т.Х. Основы общей теории нормальных и аварийных режимов энергосистем. -Ташкент.: «Фан ва технология», 2015. 80 с.
2. Насиров Т.Х., Гайибов Т.Ш. Теоретические основы оптимизации режимов энергосистем. – Т.: «Fan va texnologiya», 2014. 125 с.

Theme: CRITERIA FOR THE EXISTENCE OF STEADY-STATE POWER SYSTEMS
Тема: КРИТЕРИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ
ЭНЕРГОСИСТЕМ
Mavzu: ELEKTR TIZIMINI BARQARORLASHGAN XOLATINING MAVJUDLIK
KRITERIYALARI

Авторы:

Научный руководитель, академик Насиров Темур Хайруллаевич

Тел: +(90) 185 76 98

Магистр 2-курса Энергетического факультета, группы 61М-17

ТашГТУ Давиров Алишер Кувондик угли

Тел: +(90) 976 66 95