

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; А. Б. Бурыкин, к. т. н.; В. А. Лесько, асист.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ИЗМЕНЕНИЯМ ТРАНЗИТНЫХ ПЕРЕТОКОВ

Разработан метод оценки чувствительности параметров режима электроэнергетической системы (ЭЭС) к изменению нагрузки в узлах схемы. Возможность оценки чувствительности к изменению нагрузки в узлах примыкания с другими системами позволяет оценивать чувствительность потерь от транзитных перетоков в отдельных элементах ЭЭС. Метод основывается на использовании алгоритмов и программ расчета, а также на оценке взаимовлияния электрических сетей ЭЭС с трансформаторными связями.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, транзит мощности, анализ чувствительности, распределение потерь мощности.

Введение

Принимая во внимание тот факт, что электроэнергетическая система (ЭЭС) открыта для всех участников энергетического обмена, возникает задача исследования влияния транзитных перетоков мощности (ТПМ) на уровень дополнительных потерь электроэнергии и их уменьшение в сетях ЭЭС. На сегодня существует целый ряд методов определения потерь от транзитных перетоков (ПТП) в ЭЭС [1 - 4]. Они предназначены для определения потерь электроэнергии за определенный период времени. По различным причинам значения транзитных перетоков на протяжении этого времени могут существенно изменяться, это зависит от путей протекания транзита и места примыкания с другими системами (рис. 1), что влияет на точность определения ПТП. Отсутствие методов оперативного расчета ПТП не позволяет своевременно корректировать параметры регулирующих устройств, предназначенных для оптимизации транзитных перетоков.

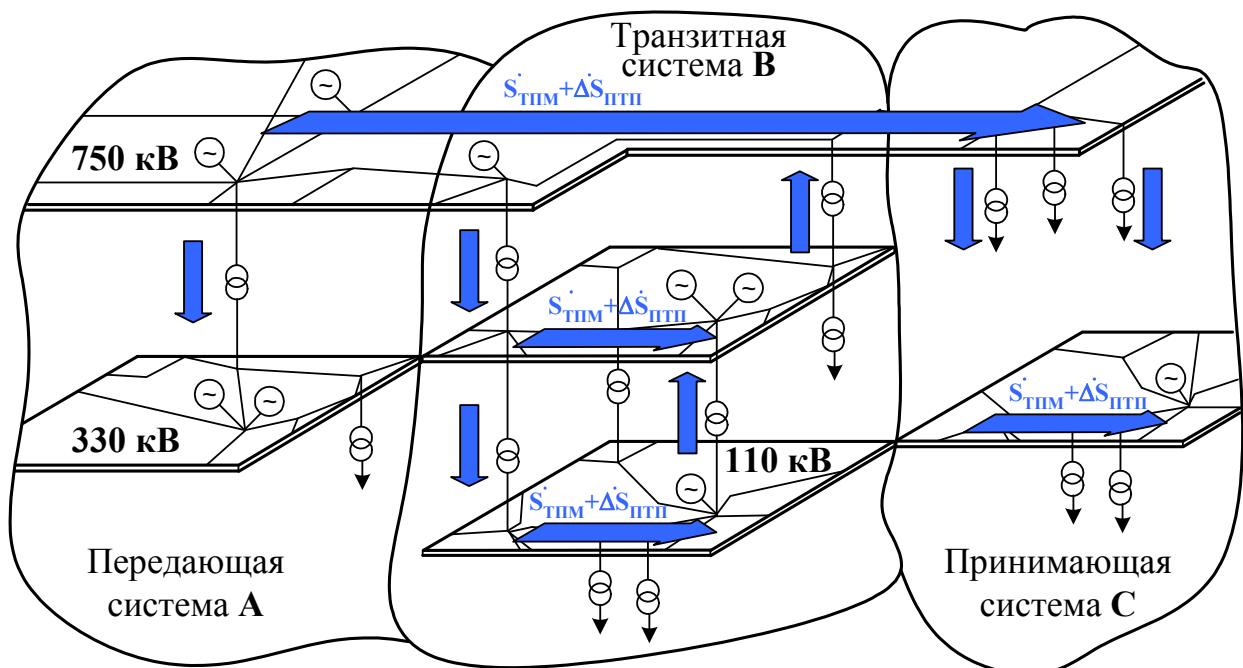


Рис. 1. Пример возможных путей протекания транзита электроэнергии

Для оперативного мониторинга ПТП и оптимального управления транзитными перетоками необходимы соответствующие методы. Одной из задач этих методов является определение элементов ЭЭС наиболее чувствительных к транзитным перетокам, в которых ПТП более всего изменяются во время возмущений как внешних, так и внутренних. Учет чувствительности оптимальных решений к изменению значения транзитных перетоков позволит, выявив в ЭЭС наиболее чувствительные элементы, осуществлять мероприятия по уменьшению потерь активной мощности более эффективными и экономически целесообразными способами. Кроме того, изменение параметров этих элементов позволит в наибольшей мере уменьшить неоднородность системы и, таким образом, приблизить ее к однородному состоянию, уменьшая дополнительные потери мощности.

Данная статья посвящена разработке метода оценки чувствительности параметров режима ЭЭС к изменению нагрузки в узлах схемы ЭЭС, в том числе в узлах примыкания с другими системами (последнее позволяет оценивать чувствительность ПТП в отдельных элементах ЭЭС). Метод основывается на использовании алгоритмов и программ расчета а также на оценке взаимовлияния электрических сетей ЭЭС с трансформаторными связями [6].

Определение матрицы коэффициентов чувствительности потерь мощности

В [6] показано, что потери мощности в ветвях схемы ЭЭС с учетом коэффициентов трансформации в неявном виде определяются таким образом:

$$\Delta \dot{S}_b = \dot{T} \dot{S}, \quad (1)$$

где $\dot{T}$ – матрица коэффициентов распределения потерь мощности в ветвях электрических сетей в зависимости от мощностей в узлах с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов связи; $\dot{S}$ – вектор нагрузок в узлах схемы.

Соответственно (1) потери мощности в i -й ветви ЭЭС рассчитываются по формуле:

$$\Delta \dot{S}_{gi} = \dot{T}_i \dot{S},$$

где

$$\dot{T}_i = (\dot{U}_i \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{U}_o^{-1}, \quad (2)$$

строка матрицы $\dot{T}$, соответствующей i -й ветви; $\dot{U}_i$ – транспонированный вектор напряжений в узлах, включая и балансирующий; $\mathbf{M}_{\Sigma i}$ – i -я строка матрицы соединений веток в узлах, включая и балансирующий; $\hat{\mathbf{C}}_i$ – i -я вектор-строка матрицы распределения токов в узлах по ветвям схемы; $\dot{U}_o$ – диагональная матрица напряжений в узлах, включая и балансирующий.

Предположим, что коэффициенты распределения потерь мощности $\dot{T}$ в ветвях не зависят от мощности транзитных перетоков и являются постоянными. Тогда во время изменения нагрузки в узлах, изменятся потери мощности в i -й ветви, значение которых рассчитываются согласно выражению:

$$\delta \Delta \dot{S}_{gi} = \dot{T}_i \delta \dot{S}, \quad (3)$$

где $\delta \dot{S} = \dot{S}^k - \dot{S}^{k+1}$ – изменение мощности нагрузки узлов ЭЭС во время перехода от k -го до $k+1$ -го режима.

Если изменение мощности нагрузки происходит лишь в j -ом узле, то прирост потерь мощности в i -й ветви от изменения мощности нагрузки j -го узла определяется следующим образом:

$$\delta \Delta \dot{S}_{ij} = \dot{t}_{ij} \delta \dot{S}_j. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что:

$$i_{ij} = \frac{\delta \Delta \dot{S}_{ij}}{\delta \dot{S}_j}. \quad (5)$$

Коэффициент i_{ij} соответствует требованиям, приведенным в [7], и является коэффициентом чувствительности потерь мощности в i -й ветви к изменению мощности нагрузки j -го узла. Таким образом, матрица $\dot{T}$ устанавливает связь между приростами потерь мощности в ветвях ЭЭС и изменениями мощности нагрузки в узлах и является матрицей чувствительности, каждый коэффициент которой состоит из элементов вида i_{ij} .

На практике в ЭЭС есть задачи, когда в узлах изменяются только активная или реактивная мощности. Если в транзитном перетоке изменяется только активная мощность ($\delta Q_j = 0$, $\delta P_j \neq 0$), то из (5) следует, что

$$i_{ij} = \frac{\delta \Delta P_{ij}}{\delta P_j} + j \frac{\delta \Delta Q_{ij}}{\delta P_j}. \quad (6)$$

В другом случае, во время компенсации реактивного перетока в узле изменяется только реактивная мощность (включается или выключается источник реактивной мощности, $\delta Q_j \neq 0$, $\delta P_j = 0$), тогда согласно выражению (5) получим, что

$$i_{ij} = \frac{\delta \Delta Q_{ij}}{\delta Q_j} - j \frac{\delta \Delta P_{ij}}{\delta Q_j}. \quad (7)$$

Поскольку критерием оптимальности нормального режима ЭЭС в данной работе являются потери активной мощности, то особый интерес представляет первая составляющая выражения (6) и вторая составляющая выражения (7). В соответствии с указанными коэффициентами формируются матрицы чувствительности T_{iP} и T_{iQ} потерь активной мощности в ветвях к изменению активной и реактивной мощностей нагрузки в узлах соответственно. Тогда потери активной мощности в i -й ветви при изменении мощности нагрузки в узлах определяются по выражению:

$$\delta \Delta P_{iP} = T_{iP} \delta P, \quad \delta \Delta P_{iQ} = T_{iQ} \delta Q, \quad (8)$$

где δP и δQ – изменение активной и реактивной мощностей нагрузки в узлах ЭЭС соответственно.

Коэффициенты чувствительности потерь мощности в ветвях к напряжению в узлах

Как видно из (2), значения коэффициентов матрицы чувствительности $\dot{T}$ в общем случае зависят от напряжения в узлах $\dot{U}_i$, которая, в свою очередь, также зависит от мощностей нагрузки и генерирования в узлах. В этом случае во время изменения мощности в узлах, потери в i -й ветви изменятся и, в отличие от (3), будут равны:

$$\delta \Delta \dot{S}_i = \dot{T}_i^k \dot{S}^k - \dot{T}_i^{k+1} \dot{S}^{k+1}.$$

С учетом того, что $\dot{S}^{k+1} = \dot{S}^k - \delta \dot{S}$, а $\delta \dot{T}_i = \dot{T}_i^k - \dot{T}_i^{k+1}$, последнее выражение переписывается:

$$\begin{aligned} \delta \Delta \dot{S}_i &= (\delta \dot{T}_i + \dot{T}_i^{k+1}) \cdot \dot{S}^k - \dot{T}_i^{k+1} \cdot (\dot{S}^k - \delta \dot{S}) = \\ &= \delta \dot{T}_i \cdot \dot{S}^k + \dot{T}_i^{k+1} \cdot \dot{S}^k - \dot{T}_i^{k+1} \cdot \dot{S}^k + \dot{T}_i^{k+1} \cdot \delta \dot{S}, \end{aligned}$$

или

$$\delta \Delta \dot{S}_i = \delta \dot{T}_i \dot{S}^k + \dot{T}_i^{k+1} \delta \dot{S}. \quad (9)$$

Если изменения произошли только в одном узле – j-ом, то согласно (9) прирост потерь мощности в i-й ветви от изменения мощности в j-ом узле $\delta\Delta\dot{S}_j$ определяется следующим образом:

$$\delta\Delta\dot{S}_{ij} = \delta i_{ij} \dot{S}_j^k + i_{ij}^{k+1} \delta\dot{S}_j. \quad (10)$$

Из последнего выражения коэффициент чувствительности потерь мощности в i-й ветви к изменению мощности в j-ом узле при переходе от k-го до k+1-го режима с учетом изменения напряжения в узлах, определяется таким образом:

$$i_{ij}^{k+1} = \frac{\delta\Delta\dot{S}_{ij}}{\delta\dot{S}_j} - \frac{\delta i_{ij}}{\delta\dot{S}_j} \dot{S}_j^k. \quad (11)$$

Сравнив (5) и (11), видим, что в общем случае чувствительность потерь мощности в i-й ветви к изменению мощности j-го узла обуславливается также коэффициентом чувствительности $\frac{\delta i_{ij}}{\delta\dot{S}_j}$ и значениями мощностей нагрузок узлов в исходном режиме $\dot{S}_j^k$.

Выражение для определения коэффициентов чувствительности δi_{ij} определяется, как разница коэффициентов матрицы $\dot{\mathbf{T}}$ для k-го и k+1-го режима, каждый из которых определяется из (2):

$$\begin{aligned} \delta\dot{\mathbf{T}}_i &= \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^{k+1} = (\dot{\mathbf{U}}_t^k \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_\delta^{-1})^k - (\dot{\mathbf{U}}_t^{k+1} \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_\delta^{-1})^{k+1} = \\ &= \hat{\mathbf{C}}_i (\delta\dot{\mathbf{U}}_{i\delta}^k - \delta\dot{\mathbf{U}}_{i\delta}^{k+1}), \end{aligned}$$

где $\delta\dot{\mathbf{U}}_{i\delta}$ – диагональная матрица, каждый элемент которой определяется из отношения

$$\frac{\Delta\dot{U}_i}{\dot{U}_j}, \quad j = \overline{1, m},$$

где $\Delta\dot{U}_i = \dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}$ – спад напряжения в i-й ветви схемы.

Значение коэффициентов матрицы $\dot{\mathbf{T}}$ дает возможность определить какие ветки наибольшим образом реагируют на смену напряжения в узлах, которая, в свою очередь, также зависит от мощностей нагрузки и генерирования в узлах.

Алгоритм определения коэффициентов чувствительности потерь мощности

Структурно–логическая схема определения коэффициентов чувствительности потерь мощности от возмущений, вызванных изменением нагрузки в узлах ЭЭС, и транзитных потоков мощности показана на рис. 2.

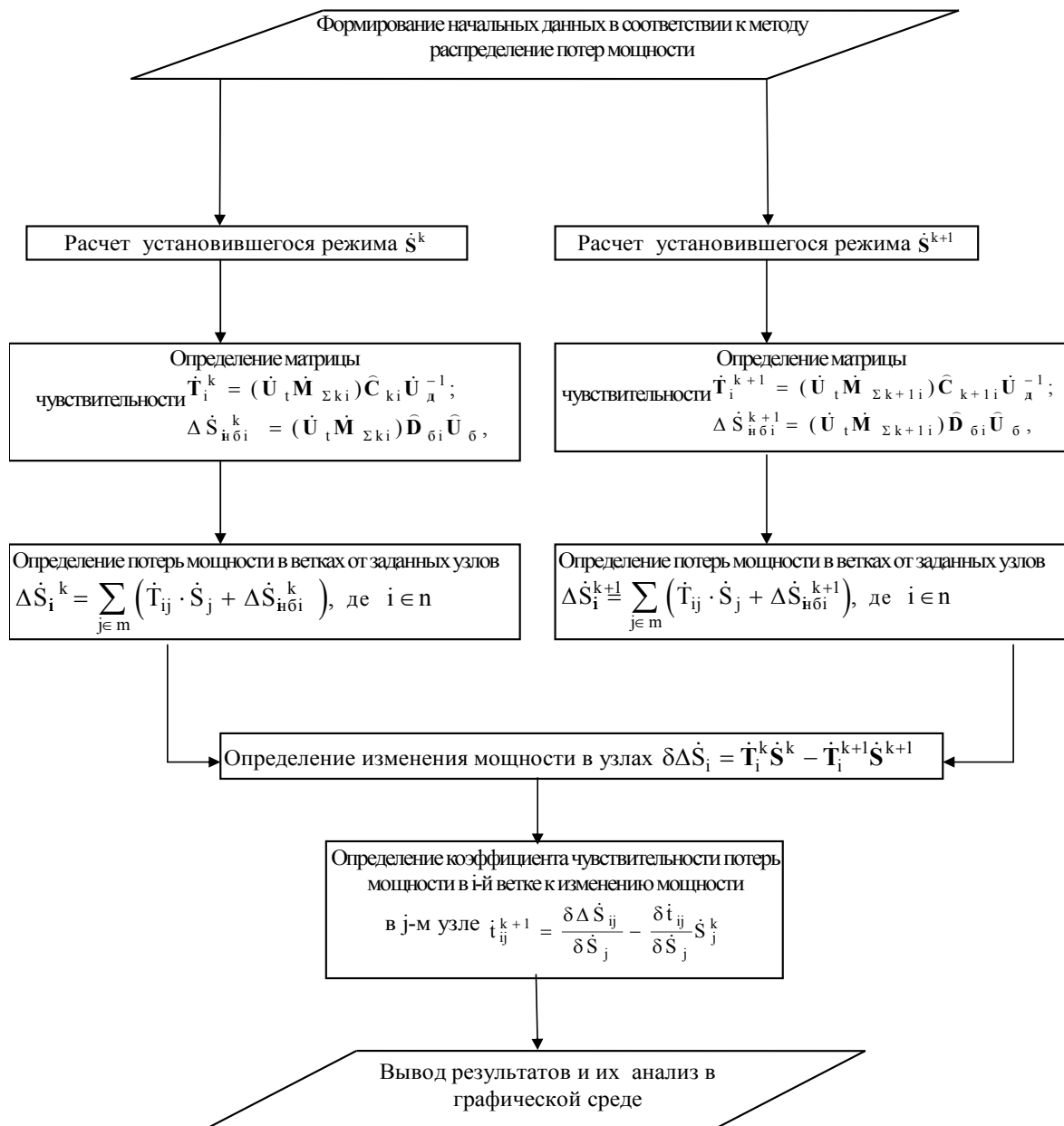


Рис. 2. Алгоритм определения коэффициентов чувствительности потерь мощности

Выводы

1. Для оперативного мониторинга потерь от транзитных перетоков и их оптимизации могут использоваться коэффициенты чувствительности потерь мощности к возмущениям в системе, в частности к изменению нагрузки или генерирования в узлах. Матрица коэффициентов чувствительности формируется по результатам расчета характерного установившегося режима и при необходимости уточняется учетом изменения напряжения в узлах схемы ЭЭС.

2. Разработанный метод оценки чувствительности параметров режима ЭЭС к изменению нагрузки в узлах схемы, позволяет оценивать чувствительность потерь мощности в отдельных ее элементах во время внешних и внутренних возмущений, таких как изменение нагрузки или генерирования отдельных узлов схемы. Применение метода относительно узлов примыкания с другими системами позволяет оценивать чувствительность потерь в отдельных элементах ЭЭС к транзитным перетокам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таласов А.Г. Потери на транзит электроэнергии и их распределение между участниками энергообмена // Электрические станции. – 2002. – № 1. – С. 20 – 25.
2. Стогний Б., Павловский В. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний // Энергетическая политика Украины. – 2004. – № 5. – С. 26 – 31.
3. Потребич А.А. Определение норматива потерь электроэнергии облэнерго с учётом её транзитных перетоков // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 10. – С. 20 – 23.
4. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Втрати потужності в електроенергетичних системах від транзитних перетікань // Енергетика та електрифікація. – 2006. – № 3. – С. 26 – 33.
5. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A.L. Guijarro, // Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms // Power Systems, IEEE, - vol. 17, pp. 571 – 576, Aug. 2002.
6. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Оцінка взаємовпливу електричних мереж енергосистем з трансформаторними зв'язками // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: проблеми сучасної електротехніки. ч. 7. – 2006. – С. 27 – 30.
7. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.

Лежнюк Петр Демьянович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем;

Бурыкин Александр Борисович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических станций и систем;

Лесько Владислав Александрович – ассистент кафедры электрических станций и систем.
Винницкий национальный технический университет