МЕТОД РАСЧЕТА ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ТРАНСФОРМАЦИЙ И НЕОДНОРОДНОСТИ СЕТИ

Радоман Н. В., Александров О. И., Свирский Д. Н.
Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники, Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь
E-mail: {feli-n, sanoleg}@mail.ru

Предлагается новый метод расчета потокораспределения в электрической сети, который основан не на физическом моделировании структуры исследуемой цепи, а на математическом моделировании структуры уравнений, описывающих потокораспределение, благодаря чему снимаются ограничения, накладываемые неоднородностью сети и наличием трансформаций.

Введение

При расчете параметров установившихся режимов в электрических сетях большой энергетической системы наибольшие трудности вызывают сети с высокой степенью неоднородности [1 – 3]. Особенно это проявляется в высоковольтных питающих, системообразующих и межсистемных линиях электропередачи. Распространенное и опубликованное в некоторых источниках убеждение в том, что приближенный раздельный расчет потоков активных и реактивных мощностей в сети при приложении к независимым узлам задающих мощностей соответствующего рода в качестве необходимого допущения требует однородности сети, неверно [2]. Как показали исследования, выполненные авторами, условие это является необходимым, но недостаточным.

I. Основная часть

Как известно, любая линейная система уравнений с симметричной матрицей коэффициентов может быть промоделирована электрической цепью по методу электрических узлов с использованием обобщенных параметров сети.

Задачу приближенного определения потокораспределения в электрической сети энергосистемы можно сформулировать исходя из допущения одинаковых напряжений в узлах. При этом для каждого i-го независимого контура схемы исследуемой цепи уравнение имеет вид:

$$\sum_{j=1}^{m_i} \dot{S}_{ij}\dot{Z}_{ij} = \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n_i} \dot{k}_{i\nu}\right)\dot{\mathbf{U}}_{av}^2, \qquad (*)$$

где m_i – общее число ветвей в контуре; n_i – число трансформаторов в контуре; $\dot{S}_{ij}, j = 1, 2, \ldots, m_i$ – комплексная полная мощность в j-й ветви i-го контура; $\dot{Z}_{ij}, j = 1, 2, \ldots, m_i$ – комплекс приведенного сопротивления соответствующей ветви; $\dot{k}_{i\nu}, \nu = 1, 2, \ldots, n_i$ – комплексный коэффициент трансформации ν-го трансформатора в i-м контуре; $\dot{\mathbf{U}}_{av}$ – средняя величина напряжения той ступени, к которой приведены сопротивления ветвей.

Это комплексное уравнение можно разложить на два действительных.

$$\sum_{j=1}^{m_i} (P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}) = \left(1 - Re\left[\prod_{\nu=1}^{n_i} \dot{k}_{i\nu}\right]\right)\dot{U}_{av}^2,$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} (P_{ij}X_{ij} - Q_{ij}R_{ij}) = -Im\left[\prod_{\nu=1}^{n_i} \dot{k}_{i\nu}\right]\dot{U}_{av}^2,$$

где P_{ij}, Q_{ij} – потоки активной и реактивной мощности в j-й ветви i-го контура, соответственно; R_{ij}, X_{ij} – соответственно активное и реактивное сопротивления j-й ветви i-го контура.

В матричной форме уравнения второго закона Кирхгофа можно представить в виде:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{NR} & \mathbf{NX} \\ \mathbf{NX} & -\mathbf{NR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}^{(Re)} \\ \mathbf{k}^{(Im)} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{N}$ – матрица контуров схемы размера $(m - k + 1) \times m$ (m – число ветвей, n – число узлов схемы); $\mathbf{R}, \mathbf{X}$ – диагональные матрицы соответственно активных и реактивных сопротивлений ветвей; $\mathbf{P}, \mathbf{Q}$ – вектор-столбцы потоков соответственно активных и реактивных мощностей в ветвях;$\mathbf{k}^{(Re)}, \mathbf{k}^{(Im)}$ – векторы правых частей уравнений вида (*), обусловленные наличием трансформаций в контурах и равные нулю, если трансформации отсутствуют.

Аналогично, уравнения первого закона Кирхгофа в матричной форме имеют вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_y \\ \mathbf{Q}_y \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{M}$ – матрица соединений схемы размера $(n - 1) \times m$; $\mathbf{O}$ – нулевая матрица размера $(n-1) \times m$; $\mathbf{P}_y, \mathbf{Q}_y$ – векторы соответственно активных и реактивных мощностей в узлах.

Полное уравнение потокораспределения в сети с использованием коэффициентов распределения можно представить в виде:

$$\left[\begin{array}{c} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{array} \right] = \mathbf{C}_n \left[\begin{array}{c} \mathbf{P}_y \\ \mathbf{Q}_y \end{array} \right] + \mathbf{C}_{tr} \left[\begin{array}{c} \mathbf{k}^{(Re)} \\ \mathbf{k}^{(Im)} \end{array} \right],$$

где $\mathbf{C}_n = \mathbf{D}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{M}^* & \mathbf{O} \\ \mathbf{O}^* & \mathbf{M} \end{pmatrix}$; $\mathbf{C}_{tr} = \mathbf{D}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{RN} & \mathbf{XN} \\ \mathbf{XN} & -\mathbf{RT} \end{pmatrix}$ – матрицы коэффициентов распределения соответственно для нагрузочных и уравнительных потоков в ветвях; $\mathbf{D}$ – матрица коэффициентов напряжений.

Если известны модули и фазы напряжений, а параметры режима не приводятся к одной ступени трансформации, то формулы для определения мощностей в начале и конце звена в матричной форме получат вид:

$$\dot{\mathbf{S}}_n = (\mathbf{G} - j\mathbf{B})\, diag\hat{\mathbf{U}}_n \left[\hat{\mathbf{U}}_n - diag\,(\mathbf{k}' + j\mathbf{k}'')\, \dot{\mathbf{U}}_k\right] +$$
$$+j\,(\mathbf{G} - j\mathbf{B})\, diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\,(\mathbf{k}' + j\mathbf{k}'') \times$$
$$\times diag\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}\mathbf{M}^*\delta,$$

где $\mathbf{G}, \mathbf{B}$ – диагональные матрицы активных и реактивных проводимостей; $diag\hat{\mathbf{U}}_n$, $diag\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}$, $diag\,(\mathbf{k}' + j\mathbf{k}'') = diag\dot{\mathbf{k}}$ – диагональные матрицы модулей напряжений в начале и конце звеньев и коэффициентов трансформации; $\dot{\mathbf{S}}_n$, $\hat{\mathbf{U}}_n$, $\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}$ – столбцовые матрицы мощностей в начале звеньев и модули напряжений в начале и конце; δ – столбец фазовых напряжений узлов относительно балансирующего; $\mathbf{M}$ – действительная матрица инциденций схемы.

Для активной и реактивной мощностей в начале ветви предыдущее уравнение преобразуется в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{P}}_n = \mathbf{G} diag\hat{\mathbf{U}}_n \left[\hat{\mathbf{U}}_n - diag\mathbf{k}'\dot{\mathbf{U}}_k\right] -$$
$$-\mathbf{B} diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\mathbf{k}''\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}} -$$
$$-\left(\mathbf{G} diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\mathbf{k}'' - \mathbf{B} diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\mathbf{k}'\right)\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}\mathbf{M}^*\delta,$$
$$\dot{\mathbf{Q}}_n = \mathbf{G} diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\mathbf{k}''\dot{\mathbf{U}}_k -$$
$$-\mathbf{B} diag\hat{\mathbf{U}}_n \left(\hat{\mathbf{U}}_n - diag\mathbf{k}'\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}\right) -$$
$$-\left(\mathbf{G} diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\mathbf{k}' - \mathbf{B} diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\mathbf{k}''\right)\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}\mathbf{M}^*\delta,$$

Выражение для мощности в конце звена было получено в виде:

$$\dot{\mathbf{S}}_k = (\mathbf{G} - j\mathbf{B})\, diag\hat{\mathbf{U}}_k \left[\hat{\mathbf{U}}_n - diag\,(\mathbf{k}' + j\mathbf{k}'')\, \dot{\mathbf{U}}_k\right] +$$
$$+j\,(\mathbf{G} - j\mathbf{B})\, diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\,(\mathbf{k}' + j\mathbf{k}'') \times$$
$$\times diag\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}\mathbf{M}^*\delta,$$

Для активной и реактивной мощностей в конце звена предыдущее уравнение преобразуется в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{P}}_k = \mathbf{G} diag\hat{\mathbf{U}}_k \left[\hat{\mathbf{U}}_n - diag\mathbf{k}'\dot{\mathbf{U}}_k\right] -$$
$$-\mathbf{B} diag\hat{\mathbf{U}}_k diag\mathbf{k}''\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}} + \mathbf{B} diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\mathbf{U}_{\mathbf{k}}\mathbf{M}^*\delta,$$
$$\dot{\mathbf{Q}}_k = \mathbf{G} diag\hat{\mathbf{U}}_k diag\mathbf{k}''\dot{\mathbf{U}}_k +$$
$$+\mathbf{B} diag\hat{\mathbf{U}}_k \left(\hat{\mathbf{U}}_n - diag\mathbf{k}'\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}\right) -$$
$$-\mathbf{G} diag\hat{\mathbf{U}}_n diag\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}\mathbf{M}^*\delta,$$

Метод ориентирован на современные программные комплексы, например математические пакеты MathCad и MathLab.

II. Заключение

Предложен новый метод расчета коэффициентов распределения для потерь в электрической сети энергосистемы от активных и реактивных мощностей в узлах и от результирующих продольных и поперечных трансформаций в контурах сети, а также методика его реализации.

Выведены матричные формулы для определения мощностей в начале и конце звена сети при известных модуле и фазе напряжения. Расчет можно выполнять без приведения к одной ступени трансформации.

Данный метод является универсальным и может быть использован для многовариантных эксплуатационных и проектных режимных расчетов для сложных электрических систем и объединений.

1. Холмский, В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Холмский // Издательство: Высшая школа, 1975. – 280 с.
2. Гурский, С. К. Алгоритмизация задач управления режимами сложных систем в электроэнергетике / С. К. Гурский // Минск. – Издательство: Наука и техника, 1977. – 368 с.
3. Clodius, D. Parallel Operation of Centrel and UCPTE Network under System Dynamics Aspects / D. Clodius // 12-th Power Systems Computation Conf. – Dresden, 19 – 23, August. – 1996.