

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. С. САФАРЯН

КОРРЕКЦИЯ Z-МАТРИЦЫ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОМПЛЕКСНЫХ  
КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ

*Введение.* С развитием сетей 220—500 кВ все больший интерес представляют методы расчета установившихся режимов с учетом продольно-поперечного регулирования коэффициентов трансформации трансформаторов, связывающих сети с различными номинальными напряжениями.

При последовательном включении в контур сети трансформаторов с различными группами соединений коэффициент трансформации выражается комплексным числом. Комплексным может быть также результирующий коэффициент трансформации при включении вольтодобавочного трансформатора или при наличии, так называемых, поперечных регулирующих трансформаторов.

При наличии в сети трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформаций матрица узловых проводимостей и Z-матрица обобщенных параметров получают несимметричными.

При многократных расчетах установившихся режимов, проводимых для оптимизации режимов по коэффициентам трансформации, с изменением любого из коэффициентов трансформации трансформаторов требуется пересчет Z-матрицы обобщенных параметров электрической системы.

Целью данной работы является разработка методов коррекции Z-матрицы обобщенных параметров при изменении комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов.

*Решение задачи.* Комплексные коэффициенты трансформаций учитываются с помощью схемы замещения трансформатора, состоящей из сопротивления рассеяния и идеального автотрансформатора (без потерь) [1—3]. Сопротивление рассеяния трансформатора приводится к ступени напряжения узла, к которому оно отнесено. Обычно сопротивление рассеяния приводится к высокой ступени напряжения (рис. 1).

В схеме замещения трансформатора с комплексным коэффициентом трансформации (рис. 1) для узлов  $p$  и  $q$ , соответственно, имеем:

$$\begin{cases} \dot{I}_p = \sum \dot{I}_p + \dot{Y}_{\text{тр}} \cdot \frac{\dot{U}_p - \dot{K}\dot{U}_q}{|\dot{K}|^2}; \\ \dot{I}_q = \sum \dot{I}_q - \dot{Y}_{\text{тр}} \cdot \frac{\dot{U}_p - \dot{K}\dot{U}_q}{\dot{K}} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\dot{I}_p, \dot{I}_q$  — задающие токи, соответственно, узлов  $p$  и  $q$ ;  $\sum \dot{I}_p, \sum \dot{I}_q$  — сумма токов ветвей, примыкающих к узлам  $p$  и  $q$ ;  $\dot{Y}_{\text{тр}}$  — проводимость трансформатора;  $\dot{K} = \frac{\dot{U}_p}{\dot{U}_q}$  — коэффициент трансформации.

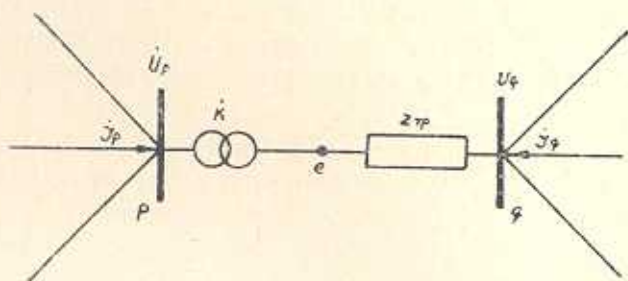


Рис. 1. Схема замещения трансформатора.

Исходя из (1), для соответствующих элементов матрицы узловых проводимостей имеем:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{pp} = \sum_k \dot{Y}_{pk} + \frac{\dot{Y}_{\text{тр}}}{|\dot{K}|^2}; \\ \dot{Y}_{pq} = -\frac{\dot{Y}_{\text{тр}}}{\dot{K}}; \\ \dot{Y}_{qp} = -\frac{\dot{Y}_{\text{тр}}}{\dot{K}}; \\ \dot{Y}_{qq} = \sum_k \dot{Y}_{qk} + \dot{Y}_{\text{тр}} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sum_k \dot{Y}_{pk}, \sum_k \dot{Y}_{qk}$  — сумма проводимостей ветвей, примыкающих к узлам  $p$  и  $q$ .

Для коррекции  $Z$ -матрицы обобщенных параметров электрических систем при изменении комплексных коэффициентов трансформации сначала скорректируем матрицу узловых проводимостей [4]:

$$Y' = Y - \Delta Y, \quad (3)$$

где  $Y, Y'$  — исходная и скорректированная матрицы узловых проводимостей;  $\Delta Y$  — матрица, учитывающая изменение в схеме.

Далее, простыми преобразованиями получаем:

$$(Y - \Delta Y) \cdot Z' = E; \quad (E - Z \cdot \Delta Y) \cdot Z' = Z; \quad Z' = (E - Z \cdot \Delta Y)^{-1} \cdot Z$$

или

$$Z' = A \cdot Z, \quad (4)$$

где

$$A = (E - Z \cdot \Delta Y)^{-1}; \quad (5)$$

$E$  — единичная матрица.

При раскрытии последнего матричного выражения выяснилось, что матрицу  $A$  можно формировать автоматически. При этом необходимо учесть следующие два случая.

а) Вершины  $p$  и  $q$ , между которыми расположен трансформатор с комплексным коэффициентом трансформации, не являются базисными узлами.

Матрица  $A$  получается следующей структуры:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{1p} & 0 & a_{1q} & 0 \\ 0 & a_{2p} & 0 & a_{2q} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{pp} & 1 & a_{pq} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{qp} & 0 & a_{qq} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{np} & 0 & a_{nq} & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

В матрице  $A$  отличны от нуля только элементы столбцов  $p$  и  $q$  и главной диагонали:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{ii} = 1; \quad i \neq p, q; \\ a_{pp} = (1 + \Delta Y_{pq} \cdot Z_{qp} - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{qq}) / D; \\ a_{qq} = (1 + \Delta Y_{qp} \cdot Z_{pq} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{pp}) / D; \\ a_{ip} = [(\Delta Y_{pq} \cdot Z_{ip} - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{iq}) \cdot (\Delta Y_{qp} \cdot Z_{qq} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{qp}) - \\ - (\Delta Y_{qp} \cdot Z_{iq} - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{ip}) \cdot (1 + \Delta Y_{pq} \cdot Z_{qp} - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{qq})] / D; \\ a_{iq} = [(\Delta Y_{qp} \cdot Z_{iq} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{ip}) \cdot (\Delta Y_{pq} \cdot Z_{pp} - \Delta Y_{qp} \cdot Z_{pq}) - \\ - (\Delta Y_{pq} \cdot Z_{ip} - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{iq}) \cdot (1 + \Delta Y_{pq} \cdot Z_{qp} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{pp})] / D; \\ D = 1 - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{qq} + \Delta Y_{pq} \cdot Z_{pq} + \Delta Y_{qp} \cdot Z_{qp} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{pp} + \\ + (\Delta Y_{pq} \cdot \Delta Y_{qp} - \Delta Y_{pp} \cdot \Delta Y_{qq}) \cdot (Z_{pq} \cdot Z_{qp} - Z_{pp} \cdot Z_{qq}), \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $\Delta Y_{pp}$ ,  $\Delta Y_{pq}$ ,  $\Delta Y_{qp}$ ,  $\Delta Y_{qq}$  — изменение соответствующих элементов матрицы узловых проводимостей.

Если в ветви с вершинами  $p, q$  трансформатор отключается, то для коррекции  $Z$ -матрицы необходимо в формулах (7) вместо  $\Delta Y_{pp}$ ,

$\Delta Y_{pq}$ ,  $\Delta Y_{pp}$  и  $\Delta Y_{qq}$  поставить соответствующие элементы матрицы узловых проводимостей.

б) Одна из вершин, примыкающих к трансформатору, является базисным узлом (трансформатор находится между узлами  $BY-q$ ):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{1q} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{qq} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ 0 & a_{nq} & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В матрице  $A$  отличны от нуля только элементы столбца  $q$  и главной диагонали:

$$\begin{cases} a_{ii} = 1; & i \neq q; \\ a_{qq} = 1/D; \\ a_{iq} = \Delta Y_{qq} \cdot Z_{iq}/D; & i \neq q; \\ D = 1 - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{qq}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\Delta Y_{qq}$  — изменение соответствующего диагонального элемента матрицы узловых проводимостей.

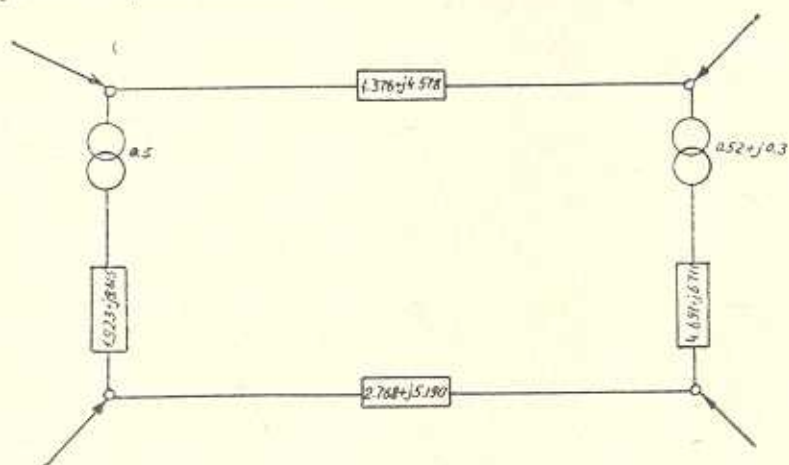


Рис. 2. Расчетная схема электрической сети.

*Практическая реализация метода.* Рассмотрим расчетную схему электрической сети (рис. 2), состоящей из 4 узлов. Пассивные параметры ветвей (сопротивления и коэффициенты трансформаций) известны. Известна также  $Z$ -матрица обобщенных параметров (10) (в качестве базисного выбран узел 4).

	1	2	3	
$Z =$	$0,436 + j1,898$	$0,344 + j0,944$	$-0,165 + j0,664$	1
	$0,344 + j0,944$	$1,186 + j2,719$	$-0,368 + j2,027$	2
	$0,502 + j0,473$	$1,546 + j1,317$	$2,089 + j4,304$	3

(10)

В ветвь с вершинами 1—4 включен трансформатор с действительным коэффициентом трансформаций, а в ветвь с вершинами 2—3 с комплексным коэффициентом трансформаций. Предполагается, что комплексный коэффициент трансформатора изменяется и становится равным  $K' = 0,34 + j0,2$ .

Для коррекции  $Z$ -матрицы обобщенных параметров необходимо сначала сформировать матрицу  $A$  (11). Для упрощения расчетов можно пренебречь изменением проводимости ветви с вершинами 2—3, возникающими при изменении комплексного коэффициента

	1	2	3	
$A =$	1	$-0,262 - j0,036$	$0,142 + j0,095$	1
	0	$0,652 + j0,037$	$0,107 + j0,030$	2
	0	$-0,228 + j0,016$	$1,161 + j0,067$	3

(11)

Далее, согласно (4), скорректируем  $Z$ -матрицу обобщенных параметров (12):

$Z' =$	$0,458 + j1,778$	$0,248 + j0,537$	$-0,095 + j0,992$	1
	$0,248 + j0,537$	$0,830 + j1,938$	$-0,175 + j1,812$	2
	$0,473 + j0,374$	$1,456 + j1,042$	$2,288 + j4,704$	3

(12)

Վ. Ս. ՍԱՅԱՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈԶԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ  
 $Z$ -ՄԱՏՐԻՑԱՅԻ ՈՒՂՂՈՒՄԸ ՏՐԱՆՏՈՐՄԱՅԻՆ ԿՈՄՊԼԵՔՍ  
 ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐԻ ՓՈՓՈԽՄԱՆ ԳԵՊԳՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Էլեկտրահամակարգերի ընդհանրացված պարամետրերի  $Z$ -մատրիցայի ուղղման համար, երբ փոփոխվում են տրանսֆորմացիայի կոմպլեքս գործա-

կիցները, առաջարկվում է մի մեթոդ, ըստ որի կառուցվում է լրացուցիչ  $A$  մատրիցա, որը ձախից բազմապատկելով  $Z$ -մատրիցայի  $Z$  մատրիցայով, ստացվում է ուղղված  $Z$ -մատրիցա: Ընդհանրացված պարամետրերի  $Z$ -մատրիցայի կորրեկցիայի առաջարկված մեթոդը կարելի է կիրառել էլեկտրահամակարգերում ցանկացած փոփոխության դեպքում (ենթադրվում է, որ փոփոխման ընթացքում համակարգի հանգույցների թիվը չի փոխվում):

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Фазылов Х. Ф., Насыров Т. Х., Брискин И. Л. К расчету установившихся режимов энергосистем с учетом комплексных коэффициентов трансформации. «Электричество», 1972, № 12, с. 7—9.
2. Фазылов Х. Ф., Брискин И. Л. Расчет установившегося режима электрических систем с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. «Труды ТашПИ», вып. 75, Ташкент, 1971.
3. Лопушинская Л. А. Алгоритм расчета установившегося режима сложных энергосистем при учете комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. «Проблемы технической электродинамики», вып. 25, Киев, «Наукова думка», 1970, с. 64—66.
4. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. М., «Энергия», 1972, 231 с.