

ЭНЕРГЕТИКА.

С. Г. АРУТЮНЯՆ

К УЧЕТУ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНЫМ
РЕГУЛИРОВАНИЕМ В РАСЧЕТАХ УСТАНОВИВШИХСЯ
РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Использование трансформаторов с продольно-поперечным регулированием позволяет за счет ввода в контуры добавочных э.д.с. принудительно перераспределять активные и реактивные мощности по линиям разных уровней напряжений и, тем самым, в значительной степени оптимизировать режим всей системы [1]. Эта задача требует анализа на ЭВМ установившихся режимов энергосистем, содержащих трансформаторы с продольно-поперечным регулированием (ТПП), с учетом их комплексных коэффициентов трансформации. При этом, из-за нарушения принципа взаимности ($Z_{21} \neq Z_{12}$), матрица проводимостей анализируемой энергосистемы получается несимметричной, что, в свою очередь, предопределяет необходимость записи полной матрицы $[Y]$ вместе обычно используемой треугольной матрицы. В связи с этим значительно увеличивается предельный объем решаемых задач. Кроме того, целый ряд типовых программ потокораспределения вообще не позволяет учесть трансформаторы с продольно-поперечным регулированием (в том числе и программа установившегося режима [2], основанная на теории многополюсника и поэтому обладающая целым рядом известных достоинств).

В настоящей статье рассматривается и обосновывается алгоритм для расчета установившегося режима энергосистем, содержащих трансформаторы с продольно-поперечным регулированием, базирующийся на алгоритме потокораспределения [2].

Постановка задачи. Схема замещения последующей энергосистемы замещается эквивалентным многополюсником с n независимыми полюсами, в число которых входят узлы генерации и нагрузки, а также узлы связи s , принадлежащие одновременно трансформаторам с продольно-поперечным регулированием. Вынесение ветвей с ТПП за пределы эквивалентного многополюсника позволяет получить симметричную матрицу $[Z]$ параметров сети с записью ее ненулевых элементов, расположенных над главной диагональю, чем обеспечивается значительное увеличение предельного объема решаемых задач. При этом для расчета установившегося режима основной сети можно использовать программу потокораспределения [2].

Выделенные трансформаторы с продольно-поперечным регулированием представляются эквивалентными четырехполюсниками с параметрами в форме [А].

В качестве исходных принимаются: а) параметры $g_{m,k}$ и $b_{m,k}$ (активные и реактивные проводимости) многополюсника с n независимыми узлами, т. е. $m, k = 1, 2, \dots, n$;

б) паспортные параметры всех σ трансформаторов с продольно-поперечным регулированием;

в) по два параметра режима для независимых узлов (за исключением выделенных узлов связи s) многополюсника из следующего числа возможных: P_s (активные мощности), Q_s (реактивные мощности), U_m (модули напряжений), ψ_s (фазы напряжений) с учетом ограничений $\alpha \neq \beta$, $m \neq f$.

Являются искомыми: параметры режима P_s , Q_s , U_s , ψ_s соответственно ξ , m , f z узлов многополюсника, включая узлы связи s .

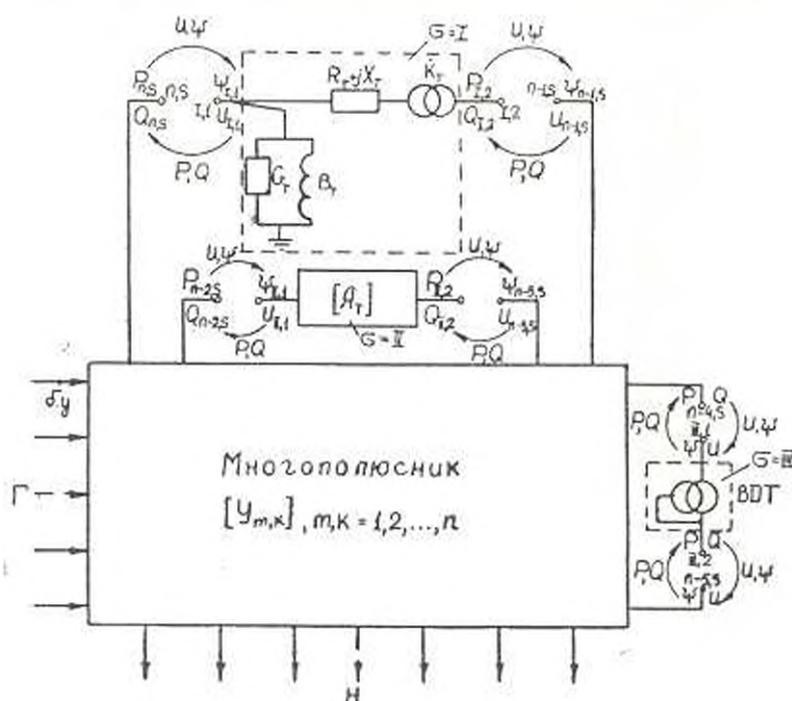


Рис. 1. Схема итерации по предполагаемой методике расчета.

Расчетные уравнения. Уравнения режима каждого σ четырехполюсника, замещающего ТПЭ (рис. 1), целесообразно записать в форме 1:

$$\begin{bmatrix} U_{1,2} \\ I_{2,1} \end{bmatrix} = [A, 1] \begin{bmatrix} U_{2,1} \\ I_{1,2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $m \neq k$; $m, k = 1, 2$ — индексы входа (1) и выхода (2) σ -го ТПЭ.

Матрица [1] параметров трансформатора с продольно-поперечным регулированием может быть представлена следующим образом:

$$|A_1| = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_1 + jX_1 \\ G_1 + jB_1 & (G_1 + jB_1)(R_1 + jX_1) + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{K}_T & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{K}_T} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \bar{K}_T & \frac{R_1 + jX_1}{K_T} \\ \bar{K}_T (G_1 + jB_1) & \frac{(G_1 + jB_1)(R_1 + jX_1) + 1}{K_T} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} K_3 + jK_4 & \frac{(K_3 - jK_4)(R_1 + jX_1)}{K^2} \\ (K_3 + jK_4)(G_1 + jB_1) & \frac{[(G_1 + jB_1)(R_1 + jX_1) + 1](K_3 - jK_4)}{K^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

где R_1 , X_1 , G_1 , B_1 — соответственно активное и реактивное сопротивления, активная и реактивная проводимости ТПТ, вычисляемые по следующим известным зависимостям:

$$R_1 = \frac{1000 \Delta P_s U_n^2}{S_n^2}; \quad X_1 = \frac{10 U_{20} U_n^2}{S_n};$$

$$G_1 = \frac{\Delta P_{22} \cdot 10^{-3}}{U_n^2}; \quad B_1 = \frac{i_{22} \cdot S_n \cdot 10^{-2}}{U_n^2}.$$

$\bar{K}_T = K_3 + jK_4$ — комплексный коэффициент трансформации ТПТ, задаваемый в расчете в виде коэффициента трансформации по продольной (K_3) и поперечной (K_4) осям.

Если в качестве заданных используются напряжения продольного регулирования U_1 и напряжение поперечного регулирования U_2 , то составляющие коэффициента \bar{K}_T вычисляются по зависимостям:

$$K_3 = \frac{U_1}{U_2} \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{U_2}{U_1 + U_2 + U_3} - \operatorname{arctg} \frac{U_2}{U_2 + U_3} \right];$$

$$K_4 = \frac{U_1}{U_2} \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{U_2}{U_1 + U_2 + U_3} - \operatorname{arctg} \frac{U_2}{U_2 + U_3} \right]. \quad (3)$$

При учете в сети одного напряжения продольно-поперечного вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) составляющие комплексного коэффициента \bar{K}_T определяются по относительным значениям продольной (E_{11}) и поперечной (E_{21}) э. д. с., ибо ВДТ маркируются как правило, по добавочным э. д. с. регулирования [3].

$$K_1 = \frac{1 + E_{1,1}}{(1 + E_{1,1})^2 + E_{1,2}^2}, \quad K_2 = -\frac{E_{1,2}}{(1 + E_{1,1})^2 + E_{1,2}^2} \quad (4)$$

Расчет установившегося режима ТПП производится непосредственным решением уравнений (5)–(8):

$$P_{1,1} = \frac{U_{1,1}}{B_1} [U_{1,1} D_1 \cos(\psi_B - \psi_D) - U_{1,2} \cos(\psi_B + \Delta\psi_{1,1-2})]; \quad (5)$$

$$Q_{1,1} = \frac{U_{1,1}}{B_1} [U_{1,1} D_1 \sin(\psi_B - \psi_D) - U_{1,2} \sin(\psi_B + \Delta\psi_{1,1-2})]; \quad (6)$$

$$\psi_{1,2} = \psi_{1,1} - \Delta\psi_{1,1-2} \quad (7)$$

$$U_{1,2} = \sqrt{a \pm \sqrt{a^2 - \frac{P_{1,2}^2 + Q_{1,2}^2}{A_1^2} B_1^2}}, \quad (8)$$

где

$$a = \frac{Q_{1,2} B_1 A_1 \sin(\psi_A - \psi_B) - P_{1,2} B_1 A_1 \cos(\psi_A - \psi_B) + 0,5 U_{1,1}^2}{A_1^2};$$

$$\psi = \psi_B - \arccos \left[\left(P_{1,2} + \frac{U_{1,2}^2 A_1}{B_1} \cos(\psi_B - \psi_A) \right) \frac{B_1}{U_{1,1} U_{1,2}} \right],$$

здесь 1, 2 — индексы начала и конца ветви с ТПП;

$A, e^{j\psi_A}, B, e^{j\psi_B}, C, e^{j\psi_C}, D, e^{j\psi_D}$ — элементы матрицы $[A]$ параметров ТПП.

Расчет установившегося режима пассивного многополюсника производится по уравнениям [2], которые в неявной форме могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} P_i^2 &= P(\dots \psi_i^{m-1} \dots U_j^{f-1} \dots); \\ Q_i^2 &= Q(\dots \psi_i^{m-1} \dots U_j^{f-1} \dots); \\ \psi_i &= \psi(\dots \psi_i^{m-1} \dots Q_m \dots U_j^{f-1} \dots); \\ U_j^2 &= U(\dots \psi_i^{m-1} \dots U_j^{f-1} \dots), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\alpha, \beta, m, f = 1 \dots n$; $\alpha \neq \beta, m \neq f$.

При совместном решении уравнений (5) ÷ (9) в расчет должны быть вовлечены уравнения связи. Так как в уравнениях (9) многополюсника мощности нагрузок берутся с отрицательным знаком, а в выражениях (5) ÷ (8) ТПП сохраняются знаки мощностей, то эти условия для входного ($\alpha, 1$) и выходного ($\alpha, 2$) узлов каждого σ ТПП, замещаемого эквивалентным четырехполюсником, соответственно будут иметь следующий вид:

$$U_{\alpha,2} = U_{1,1}; \quad \psi_{\alpha,2} = \psi_{1,1}; \quad P_{\alpha,2} = -P_{1,1}; \quad Q_{\alpha,2} = -Q_{1,1}; \quad (10)$$

$$U_{n-1,1} = U_{n,2}; \quad \psi_{n-1,1} = \psi_{n,2}; \quad P_{n-1,1} = P_{n,2}; \quad Q_{n-1,1} = Q_{n,2}. \quad (11)$$

Схема итерации по совместному решению уравнений (5) и (11) строится следующим образом. Вначале выполняется один шаг $(i-1)$ для построения решения по методу Зейделя уравнений (9) в петлюника. При этом в качестве исходных параметров режима для узлов, соответствующих узлам генерации и нагрузок, принимаются по два параметра из P, Q, U, ψ при учете ограничений $\alpha \neq \beta, j \neq m$. В узлах связи с многополюсника с ТПП задается система параметров режима, указанная на рис. 1. Эти параметры известны лишь в первом приближении, поэтому в первом шаге итерации задаются их нулевые приближения, например $P_{n,1} = P_{ном}, Q_{n,1} = Q_{ном}, U_{n-1,1} = U_{ном}, \psi_{n-1,1} = 0$. В результате одного шага расчета уравнений (9) в узлах связи с определяются параметры $U_{n,2}, \psi_{n,2}$ и $P_{n-1,1}, Q_{n-1,1}$, которые, с учетом уравнений связи (10) и (11), используются в качестве исходных для решения уравнений (5) и (9). В результате безытерационного решения уравнений (5) и (9) определяются параметры режима ТПП: $P_{2,1}, Q_{2,1}, U_{1,2}, \psi_{1,2}$, — которые с учетом уравнений связи (10) и (11) используются для расчета уравнений (9) уже во втором шаге итерации и т. д. Расчет продолжается до сходимости итерационного процесса, проверяемого по балансу активных и реактивных мощностей во всех независимых узлах многополюсника. Параметры режима независимых узлов многополюсника могут служить в качестве исходных для расчета режима внутренних (исключенных при эквивалентировании) узлов.

Программа, реализующая предлагаемый алгоритм по учету трансформаторов с продольно-поперечным регулированием, разработана применительно к ЭВМ семейства «Иван». Выполненные по этой программе расчеты показывают эффективность предлагаемого алгоритма как с точки зрения удобства учета ТПП с комплексными коэффициентами трансформации, так и сходимости итерационного процесса.

Пример расчета и результаты исследований. В качестве примера был выполнен расчет установившегося режима одной энергосистемы, представленной 12 генераторными, 25 нагрузочными и 13 сетевыми узлами. Результаты анализа у. р. данной энергосистемы показывают (табл. 1), что основные потоки активной мощности распределяются по сети 110 кВ, передачи 330 кВ мало загружены при значительных перетоках реактивных мощностей. Все это приводит к значительным потерям активной мощности и неоптимальному (по потерям) режиму сети.

В то же время использование трансформаторов с продольно-поперечным регулированием — автотрансформаторов АТДЦТГ-120000/330/110 с вольтодобавочными трансформаторами ВРДНУ-12000/35/35, параметры которых даны в табл. 2, позволяет принудительно перераспределить мощности по линиям 110 кВ и 330 кВ,

при этом основные потоки транзитной энергии передают уже на ВЛ 330 кВ (табл. 1).

Таблица 1

	Потоки мощности по отдельным ВЛ—110 кВ, Мва	Потоки мощности по ВЛ—330 кВ, Мва
без ТП	$55,2 + j30,3$	$22,7 + j45,6$
	$52,6 + j31,7$	$18,2 + j40,2$
	$48,3 + j28,2$	
	$45,9 + j21,8$	
с ТП	$21,6 + j18,2$	$93,6 + j71,3$
	$15,7 + j12,8$	$82,4 + j61,5$
	$16,1 + j15,3$	
	$14,5 + j12,7$	

Таблица 2

ВЛ—120000—330—121	$U_{\text{ТП}}, \text{кВ}$	$U_{\text{ВЛ}}, \text{кВ}$	$U_{\text{КЗ, В-П}}, \text{ }^\circ\text{с}$	$U_{\text{КЗ, П-П}}, \text{ }^\circ\text{с}$	$U_{\text{КЗ, С-П}}, \text{ }^\circ\text{с}$
	330	115	9,85	33,2	21,7
ВЛ—120000—330—36	$P_{\text{ВЛ}}, \text{кВт}$	$P_{\text{КЗ, В-П}}, \text{кВт}$	$P_{\text{КЗ, П-П}}, \text{кВт}$	$P_{\text{КЗ, С-П}}, \text{кВт}$	$t_{\text{дл}}, \text{ }^\circ\text{с}$
	180	410	270	230	2
ВЛ—120000—330—36	$P_{\text{дл}}, \text{кВт}$	$P_{\text{КЗ, В-П}}, \text{кВт}$	$t_{\text{дл}}, \text{ }^\circ\text{с}$	$U_{\text{ном, вст}}, \text{кВ}$	$I_{\text{прт}}, \text{А}$
	33	142	3,3	$-18,758$ $-18,758$	407

Расчет у. р. исследуемой энергосистемы сходится к некоторому решению с заданной точностью небаланса мощности $\Delta S = 0,5 \text{ МВА}$ за 67 шагов итерации ($n=65$), время расчета на ЭИВМ «Наирн-2»—10 мин. Динамика сходимости итерационного процесса представлена на рис. 2. На рассматриваемом примере расчета была апробирована другая схема итерации, используемая в [4] для расчета у. р. энергосистем, имеющих в своем составе ветви с отрицательными реактивными сопротивлениями. Однако эта схема итерации, основанная на комбинированном использовании внутренней и внешней итераций, для рассматриваемого класса задач оказалась менее эффективной и сложной при наличии многих ТП. Несмотря на это, сходимость итерации для рассматриваемого примера расчета обеспечивается за 14 циклов внешних итераций ($\Omega=14$), время расчета—13 мин. Динамика сходимости итерации представлена на рис. 3.

Нетрудно заметить, что уравнение (8) дает два значения напряжения: $U_{s,2}^{(1)}$ и $U_{s,2}^{(2)}$, ибо задача определения режима ТПП является также нелинейной. Однако на основе выполненной серии расчетов и сопоставления двух корней уравнения (8) можно сделать заключение, справедливое также для аналогичной зависимости, используемой в [4], что физически реализуемым режимом является решение математической модели, когда

$$U_{s,2} = \sqrt{a} + \sqrt{a^2 - \frac{P_{s,2}^2 + Q_{s,2}^2}{A^2} B_1^2}.$$

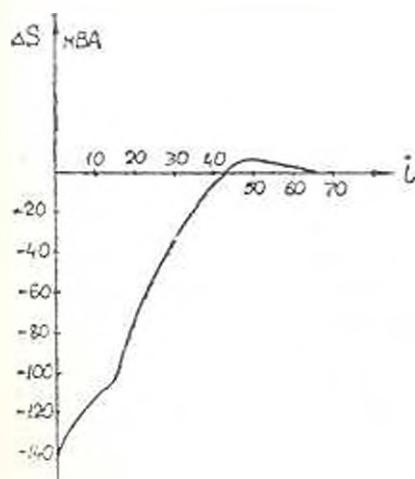


Рис. 2. Пример сходимости итерационного процесса по предлагаемому методике.

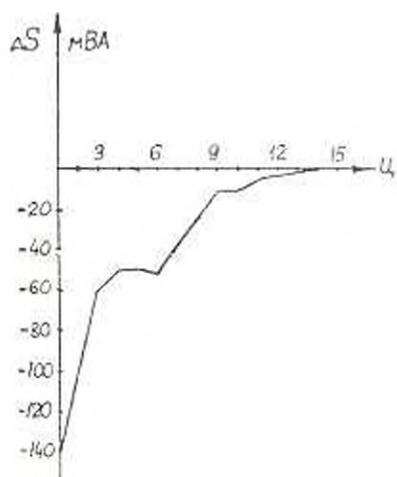


Рис. 3. Сходимость итерационного процесса того же примера расчета по схеме итерации [4].

Возможность записи ненулевых элементов лишь треугольной матрицы $[Y]$ параметров многополюсника, благодаря выделению ветвей с ТПП, позволяет существенно увеличить предельный объем решаемых задач. Учет комплексных коэффициентов, как это следует из опыта расчетов, не оказывает существенного влияния на сходимость итерации по предлагаемому алгоритму. При этом практические критерии сходимости для выбранной схемы итерации соответствуют критериям, полученным в [2].

Выводы

1. Предложен алгоритм для расчета установившихся режимов энергосистем, учитывающий трансформаторы с продольно-поперечным регулированием.

