

В.С. САФАРЯН

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОТОКОВ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Предлагается метод определения доли покрытия активной мощности потребителей от каждого источника, а также доли потерь активной мощности, покрываемых от каждого источника и вызванных каждым потребителем. Вводится понятие ориентированного графа P цепи, пути которого определяют структуру потоков и потерь активной мощности в цепи.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, структурный анализ, доля потерь, ориентированный граф P , монотонная цепь, сингулярная цепь.

В современных условиях перехода энергетики к рыночным отношениям весьма актуальными являются вопросы распределения потерь мощности (энергии) между источниками и потребителями, а также определения доли покрытия потребителей от каждого источника.

В [1] предлагается метод определения потерь электроэнергии от транзитных потоков, основанный на матрице токораспределения, т.е. на методе наложения. При этом, как отмечено в [1], потери транзитной мощности нельзя определять как разность потерь в сети при наличии и отсутствии заданной транзитной мощности, т.е. здесь неприменим метод наложения. Однако в [1] матрица составляющих потерь определяется методом наложения.

Рассмотрим электроэнергетическую систему (ЭЭС), состоящую из m источников и n потребителей (рис. 1).

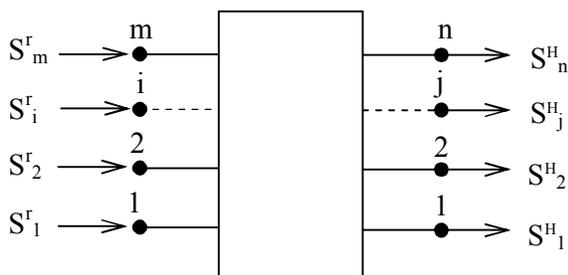


Рис. 1

Постановка задачи. После расчета установившихся режимов (УР) ЭЭС необходимо определить:

- доли потерь, покрываемых от каждого источника, представленных в виде слагаемых по каждой ветви;
- доли потерь, вызванных каждым потребителем, представленных в виде слагаемых по каждой ветви;
- доли покрытия мощности потребителей от каждого источника.

Результаты анализа удобно представить в виде следующих матриц:

	H_1	...	H_j	...	H_n	ΔP^r
Γ_1	P_{11}		P_{1j}		P_{1n}	ΔP_{11}^r
...						
Γ_i	P_{i1}		P_{ij}		P_{in}	ΔP_{i1}^r
...						
Γ_m	P_{m1}		P_{mj}		P_{mn}	ΔP_{m1}^r
ΔP^H	ΔP_{11}^H		ΔP_{j1}^H		ΔP_{n1}^H	
	Γ_1	...	Γ_j	...	Γ_m	

(1)

1	ΔP_{11}^r		ΔP_{1j}^r		ΔP_{1m}^r	ΔP_1
...						
i	ΔP_{i1}^r		ΔP_{ij}^r		ΔP_{im}^r	ΔP_i
...						
b	ΔP_{b1}^r		ΔP_{bj}^r		ΔP_{bm}^r	ΔP_b
	ΔP_1^r		ΔP_j^r		ΔP_m^r	

(2)

	H_1	...	H_j	...	H_n	
1	ΔP_{11}^H		ΔP_{1j}^H		ΔP_{1n}^H	ΔP_1
...						
i	ΔP_{i1}^H		ΔP_{ij}^H		ΔP_{in}^H	ΔP_i
...						
b	ΔP_{b1}^H		ΔP_{bj}^H		ΔP_{bn}^H	ΔP_b
	ΔP_1^H		ΔP_j^H		ΔP_n^H	

(3)

где P_{ij} - доля потребности активной мощности j -го потребителя, покрываемой i -ым источником; ΔP_i^r - доля потерь активной мощности ЭЭС ((P)), покрываемых i -ым источником; ΔP_j^r - доля потерь активной мощности ЭЭС, вызванных j -ым потребителем; ΔP_{ij}^r - потери в i -й ветви, покрываемые j -ым источником; ΔP_{ij}^H - потери в i -й ветви, вызванные j -ым потребителем; (P_i - потери в i -й ветви; b - число ветвей).

Очевидно, что должны быть соблюдены соотношения

$$P_i^r = \sum_{j=1}^n P_{ij} + \Delta P_i^r, \quad i = \overline{1, m}, \quad P_j^H = \sum_{i=1}^m P_{ij}, \quad j = \overline{1, n},$$

$$\Delta P^f = \sum_{i=1}^m \Delta P_i^f = \Delta P,$$

$$\Delta P^h = \sum_{j=1}^n \Delta P_j^h \leq \Delta P. \quad (4)$$

Знак равенства в (4) имеет место лишь тогда, когда в холостом режиме потери активной мощности ЭЭС равны нулю.

Прежде чем приступить к решению поставленной задачи, рассмотрим ряд вспомогательных задач:

а) Определить доли потерь, вызываемых токами \hat{I}_1 и \hat{I}_2 , при их совместном протекании по комплексному сопротивлению Z (рис. 2а).

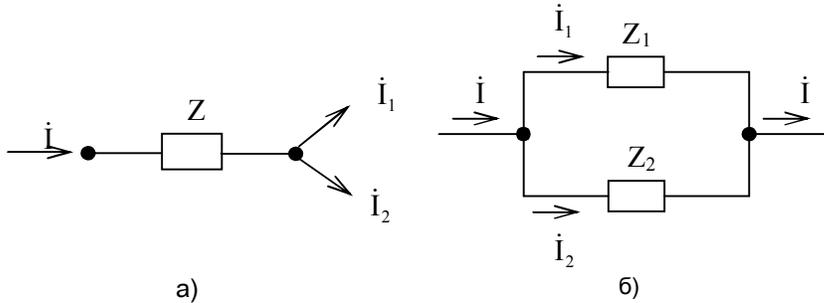


Рис. 2

Представим участок цепи сопротивлениями $Z_1 = \dot{U}/\hat{I}_1$, $Z_2 = \dot{U}/\hat{I}_2$, через которые протекают токи \hat{I}_1 и \hat{I}_2 (рис. 2б). Для доли потерь (S_1 и S_2) получаем

$$\Delta S_1 = I_1^2 Z_1 = I_1^2 \dot{U}/\hat{I}_1 = \dot{U} \hat{I}_1 = Z \hat{I}_1^2 = Z I^2 \hat{I}_1 / \hat{I},$$

$$\Delta S_2 = I_2^2 Z_2 = I_2^2 \dot{U}/\hat{I}_2 = \dot{U} \hat{I}_2 = Z \hat{I}_2^2 = Z I^2 \hat{I}_2 / \hat{I}.$$

Таким образом, доли потерь от токов \hat{I}_1 и \hat{I}_2 составляют соответственно \hat{I}_1/\hat{I} и \hat{I}_2/\hat{I} части от общих потерь. Отметим, что в долях потерь активная часть может иметь отрицательный знак.

б) Определить токораспределение в цепи по заданным узловым токам независимых источников токов с нулевыми сопротивлениями ветвей (сингулярные цепи).

На первый взгляд, кажется, что любой набор токов ветвей, который удовлетворяет первому закону Кирхгофа, является решением задачи, поскольку заведомо удовлетворяется второй закон Кирхгофа.

Для решения поставленной задачи сначала рассмотрим цепи с одинаковыми сопротивлениями ветвей (монотонные цепи). Если значение сопротивления ветви стремится к нулю, монотонные цепи превращаются в сингулярные. Покажем, что токораспределение монотонной цепи не зависит от значения ее сопротивления при возбуждении цепи независимыми источниками токов. Из выражения матрицы коэффициентов токораспределения

$$C = Y_b M^t Y^{-1}$$

(где Y_b - диагональная матрица проводимостей ветвей; M^t - транспонированная матрица соединений по узлам; Y - матрица собственных и взаимных проводимостей схемы сети) следует, что она не зависит от значения сопротивления ветвей, т.е. токораспределение монотонной цепи определяется только значениями узловых токов и конфигурацией цепи. Аналогичный вывод верен для сингулярных цепей. Таким образом, в уравнениях по второму закону Кирхгофа для монотонных и сингулярных цепей падения напряжения могут быть заменены соответствующими токами.

в) Рассмотрим узел в цепи постоянного тока, где примыкаются 4 ветви с известными значениями токов (рис. 3а).

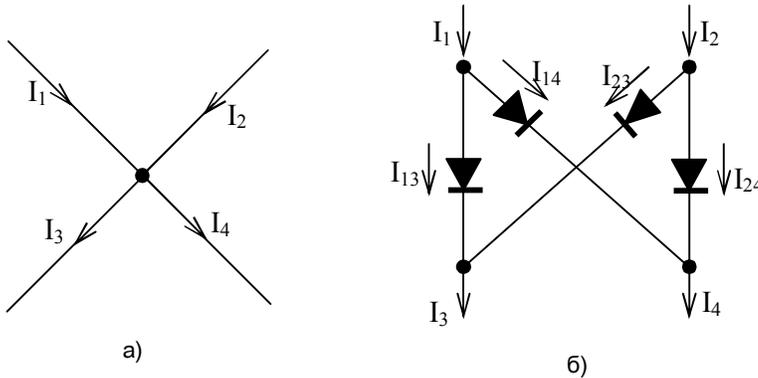


Рис. 3

Принимая, что I_1, I_2 - токи источников, а I_3, I_4 - токи потребителей, требуется определить составляющие токов I_3, I_4 от токов I_1 и I_2 .

Естественно полагать, что решение поставленной задачи определяется режимом нелинейной сингулярной цепи (рис. 3б) с математической моделью:

$$\begin{aligned} I_{13} + I_{14} &= I_1, & I_{23} + I_{24} &= I_2, & I_{13} + I_{23} &= I_3, \\ I_{13} - I_{23} + I_{24} - I_{14} &= 0, & \text{если } I_{13} I_{23} I_{24} I_{14} &\neq 0, \\ I_{13} \geq 0, & I_{14} \geq 0, & I_{23} \geq 0, & I_{24} \geq 0. \end{aligned}$$

Известно, что в электрических цепях, состоящих из нелинейных резисторов с пассивными вольт-амперными характеристиками и независимыми идеальными источниками энергии (напряжения и тока), токи в ветвях распределяются единственным образом [2]. Вышеприведенная нелинейная сингулярная цепь (с идеальными диодами) является нелинейной, состоящей из нелинейных элементов с пассивными вольт-амперными характеристиками, следовательно, имеет единственное решение. Аналогичное решение можно привести для случая, когда токи заменены активными мощностями с любым числом ветвей (рис. 3а).

Приведем алгоритм решения поставленной задачи, сопровождая его иллюстрацией для схемы цепи, граф которой представлен на рис. 4 (режимные параметры цепи приведены в таблице). На схеме указаны направления и величины потоков активной мощности.

Алгоритм решения задачи сводится к следующему:

1. Анализом результатов режима устанавливаются направления потоков активной мощности ветвей и строится ориентированный граф (назовем оргграф Р), ветви которого ориентированы по направлениям потоков активной мощности ветвей (рис. 4). Если в некоторой ветви потоки активной мощности направлены встречно, то такие ветви отключаются. Можно показать, что оргграф Р является ациклическим.

2. Если в оргграфе Р существует путь (ориентированный) между i -ым источником и j -ым потребителем (их может быть несколько), то i -й источник участвует в покрытии потребности j -го потребителя, т.е. $P_{ij} \neq 0$, в противном случае, $P_{ij} = 0$. Определение значений P_{ij} осуществляется анализом потоков в пути i - j , используя вышеприведенные методы.

3. Если в оргграфе Р существует путь, проходящий через j -ю ветвь, для которого i -й потребитель является конечным узлом, то i -й потребитель вызывает потери в j -й ветви.

4. Если в оргграфе Р существует путь, проходящий через j -ю ветвь, для которого i -й источник является начальным узлом, то i -й источник участвует в покрытии потерь в j -й ветви.

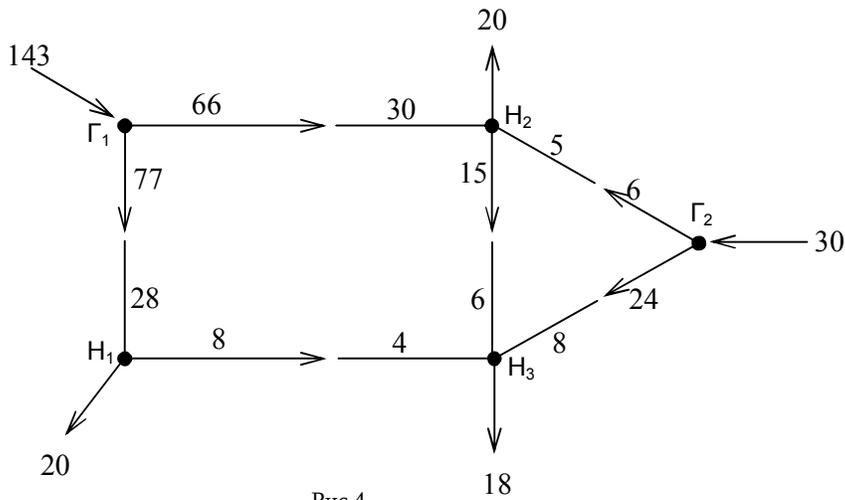


Рис.4

Таблица

Узлы	I, A	U, B	P, Вт	Ветви	I	P _{нач}	P _{кон}	ΔP	r
Г ₁	13	11	143	Г ₁ - Н ₁	7	77	28	49	1
Г ₂	5	6	30	Г ₁ - Н ₂	6	66	30	36	1
Н ₁	5	4	20	Н ₁ - Н ₃	2	8	4	4	1
Н ₂	4	5	20	Н ₂ - Н ₃	3	15	6	9	1
Н ₃	9	2	18	Г ₂ - Н ₂	1	6	5	1	1
				Г ₂ - Н ₃	4	24	8	16	1

Матрицы, подобные (1), (2), (3), для приведенного примера будут равны

			H ₁	H ₂	H ₃	ΔP ^Г
	Г ₁		20	16,25	9,5	97,25
	Г ₂		0	3,75	8,5	17,75
	ΔP ^Н		35	20,25	59,75	
	Г ₁	Г ₂	H ₁	H ₂	H ₃	ΔP
Г ₁ -H ₁	49	0	35	0	14	49
Г ₁ -H ₂	36	0	0	19,5	16,5	36
H ₁ -H ₃	4	0	0	0	4	4
H ₂ -H ₃	8,25	0,75	0	0	9	9
Г ₂ -H ₂	0	1	0	0,75	0,25	1
Г ₂ -H ₃	0	16	0	0	16	16
	97,25	17,75	35	20,25	59,75	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филиппова Т.А., Азаров В.С.** Потери электроэнергии от транзитных перетоков в электрических сетях // Электричество.- 1990.- № 4. – С.64-67.
2. **Басан С.Н.** Электрические цепи с нелинейными резисторами.- Ростов-на-Дону. – 1984. - 200 с.

ЗАО “Институт энергетики РА”. Материал поступил в редакцию 05.04.2000.

Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈՎԱՆ ՇՂԹԱՆԵՐՈՒՄ ՀՈՐՈՒԹՅԱՆ ՀՈՍՔԵՐԻ ԵՎ ԿՈՐՈՒՍՏԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Առաջարկվում է էլեկտրական շղթայի յուրաքանչյուր աղբյուրից սպառիչների ակտիվ հզորության պահանջարկի բաժնեմասերի որոշման մեթոդ: Որոշվում են նաև ակտիվ հզորության կորուստներում յուրաքանչյուր աղբյուրի ծածկման և յուրաքանչյուր սպառիչի առաջացրած բաժնեմասերը: Մտցվում է շղթայի P ուղղորդված գրաֆիկի հասկացություն, որի ուղղորդված ճանապարհները որոշում են շղթայում ակտիվ հզորության հոսքերի և կորուստների կառուցվածքը:

V. S. SAFARYAN

STRUCTURAL ANALYSIS OF POWER FLOWS AND LOSSES IN ELECTRICAL CIRCUITS

A method for determination of consumers active power covering share from each power source, as well as the active power loss share covered by each source and caused by each consumer, is suggested. The concept of the oriented circuit P-graph, its parts defining the structure of the active power flows and losses in the circuit is also introduced.