

УДК 621.311

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 кВ С УЧЕТОМ ПОВТОРНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НУЛЕВОГО ПРОВОДА

Докт. техн. наук ФУРСАНОВ М. И., канд. техн. наук ЗОЛОТОЙ А. А.,
инж. МАКАРЕВИЧ В. В.

Белорусский национальный технический университет

Производственно-техническим отделам и проектным группам филиалов электрических сетей энергосистем часто приходится выполнять расчеты режимов как существующих, так и проектируемых сетей напряжением 0,38 кВ.

Расчет режима в таких случаях принято производить по упрощенному алгоритму, основные положения которого приведены ниже [1].

1. На основании имеющихся данных о длинах и марках проводов определяются полные сопротивления участков распределительной линии (РЛ) $\underline{Z}_i$

$$\underline{Z}_i = R_i + jX_i = (R_{0i}l_i) + j(X_{0i}l_i), \quad (1)$$

где R_{0i} , X_{0i} – удельные активное и индуктивное сопротивления провода; l_i – длина участка.

Имея в виду, что фазы A , B , C и нуль N в сети могут быть выполнены различными проводами, величины $\underline{Z}_{Ai}$, $\underline{Z}_{Bi}$, $\underline{Z}_{Ci}$, $\underline{Z}_{Ni}$ вычисляются по выражению (1) отдельно.

2. По заданным активной и реактивной мощностям нагрузок в узлах распределительной линии определяются полные (комплексные) токи нагрузок $\underline{I}_{kj}$

$$\underline{I}_{kj} = \frac{P_{kj} + jQ_{kj}}{\underline{U}_k}, \quad (2)$$

где $\underline{U}_k$ – фазное напряжение на шинах низшей стороны трансформаторных подстанций (ТП) 6–20/0,38 кВ; P_{kj} , Q_{kj} – активные и реактивные фазные мощности нагрузок узлов линии 0,38 кВ; $k = A, B, C$.

3. Токи в проводах на участках распределительной линии $\underline{I}_{ki}$ находятся по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_{ki} = \sum_{j=1}^n \underline{I}_{kj}, \quad (3)$$

где n – количество нагрузочных узлов.

Ток в нулевом проводе $\underline{I}_{Ni}$ определяется в виде суммы токов фаз и при симметричной нагрузке равен нулю

$$\underline{I}_{Ni} = \underline{I}_{Ai} + \underline{I}_{Bi} + \underline{I}_{Ci}. \quad (4)$$

4. Фазные падения напряжения при несимметричной нагрузке $\underline{\Delta U}_{ki}$ рассчитываются через симметричные составляющие по выражению [2, (5.64)]

$$\underline{\Delta U}_{ki} = \underline{I}_{ki} \underline{Z}_i + \underline{I}_{0i} (\underline{Z}_{0i} - \underline{Z}_i), \quad (5)$$

где $\underline{I}_{ki}$ – фазный ток i -го участка, равный сумме симметричных составляющих токов прямой, обратной и нулевой последовательностей; $\underline{Z}_i$ – полное сопротивление прямой и обратной последовательностей участка; $\underline{I}_{0i}$, $\underline{Z}_{0i}$ – ток и полное сопротивление нулевой последовательности.

На практике расчеты сетей 0,38 кВ удобно вести в фазных координатах. Для четырехпроводной электрической сети, в которой нулевой провод является четвертым, можно записать:

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_k + 3\underline{Z}_N; \quad (6)$$

$$\underline{I}_N = 3\underline{I}_0, \quad (7)$$

где $\underline{Z}_k$ – полное сопротивление фазного провода; $\underline{Z}_N$ – полное сопротивление нулевого провода; $\underline{I}_N$ – ток в нулевом проводе.

Подставив в (5) зависимости (6), (7), получим более удобное для практических расчетов выражение для определения величины $\underline{\Delta U}_{ki}$ в фазных координатах

$$\underline{\Delta U}_{ki} = \underline{I}_{ki} \underline{Z}_{ki} + \underline{I}_{Ni} \underline{Z}_{Ni}. \quad (8)$$

5. Напряжения в узлах сети находятся в виде разности между напряжением предыдущего узла $\underline{U}_{kj-1}$ и падением напряжения на участке $\underline{\Delta U}_{ki}$:

$$\underline{U}_{kj} = \underline{U}_{kj-1} - \underline{\Delta U}_{ki}; \quad k = A, B, C. \quad (9)$$

6. Потери активной мощности на участках распределительной линии определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{ki} &= I_{ki}^2 R_{ki}, \quad k = A, B, C; \\ \Delta P_{Ni} &= I_{Ni}^2 R_{Ni}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где ΔP_{ki} – потери активной мощности на i -м участке фазы; ΔP_{Ni} – потери активной мощности на i -м участке нулевого провода.

Суммарные потери активной мощности во всей сети составляют

$$\Delta P = \sum_{i=1}^m \Delta P_{Ai} + \Delta P_{Bi} + \Delta P_{Ci} + \Delta P_{Ni}, \quad (11)$$

или в процентах

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 \%, \quad (12)$$

где m – количество ветвей схемы рассматриваемой сети; P – суммарная активная мощность РЛ.

В практических расчетах приведенная методика часто применяется в еще более упрощенном виде и не учитывает влияния повторных заземлений нулевого провода, которые согласно [3, п. 1.7.63] должны устанавливаться на концах воздушных линий (ВЛ), ответвлениях от ВЛ более 200 м и вводах от ВЛ к электроустановкам, подлежащим занулению. По условиям защиты от грозовых перенапряжений могут осуществляться и более частые заземления [3, п. 2.4.26].

Оценим влияние учета повторного заземления нулевого провода на режим воздушной РЛ 0,38 кВ, однолинейная схема которой представлена на рис. 1.

На рис. 1 буквами A, B, C указано наличие разного количества фаз на участках РЛ. Длины участков даны в километрах. Знаком « $\nabla_{\text{зем}}$ » отмечены узлы сети, в которых выполнено повторное заземление нулевого провода. В узлах 3, 5, и 7 повторное заземление нулевого провода выполнено согласно [2, п. 1.7.63], так как узел 5 – конец ВЛ, 7 – ответвление от ВЛ длиной 217 м, в узле 3 находится электроприемник, подлежащий занулению.

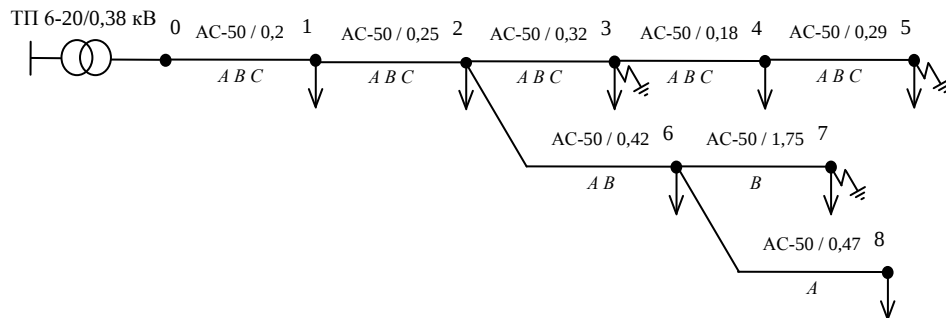


Рис. 1. Схема распределительной линии 0,38 кВ

Расчетная схема замещения рассматриваемой РЛ представлена на рис. 2. Топологические данные по схеме (рис. 2) и значения Z_i (п. 1 алгоритма) приведены в табл. 1 (буква Ф обозначает фазный провод, N – нулевой) режимные данные о нагрузках в узлах РЛ пересчитаны в полные токи (п. 2 алгоритма) и приведены в табл. 2.

Примем допущения о том, что напряжения на шинах низкого напряжения трансформаторной подстанции (ТП) симметричны: фазы напряжений сдвинуты на 120° относительно друг друга, а их модули равны 231 В.

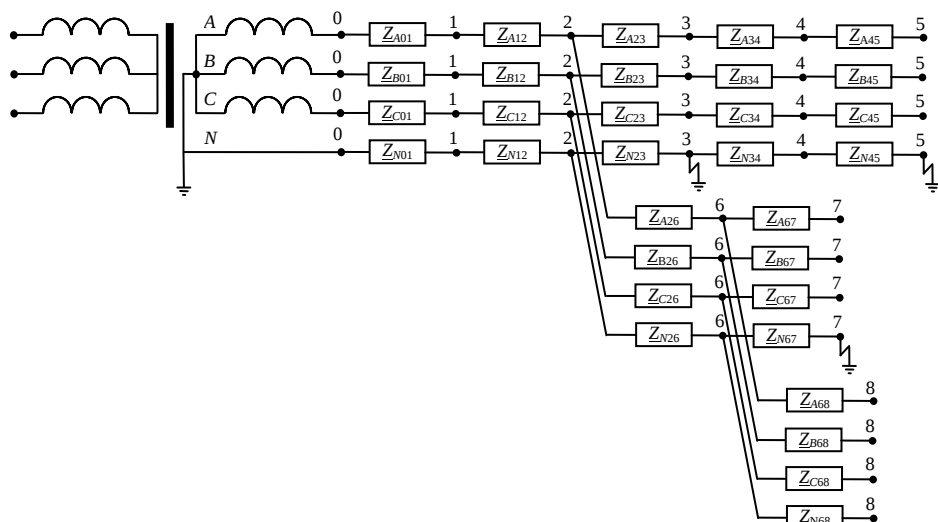


Рис. 2. Схема замещения распределительной линии 0,38 кВ

Таблица 1

Исходные данные по распределительной линии 0,38 кВ

Номер начала	Номер конца		Марка проводника	Длина ветви, км	Полное сопротивление ветви, Ом
0	1	Ф	АС-50	0,2	$0,12 + j0,08$
		N	АС-35	0,2	$0,15 + j0,08$
1	2	Ф	АС-50	0,25	$0,15 + j0,1$
		N	АС-35	0,25	$0,19 + j0,1$
2	3	Ф	АС-50	0,32	$0,19 + j0,12$
		N	АС-35	0,32	$0,25 + j0,13$
3	4	Ф	АС-50	0,18	$0,11 + j0,07$
		N	АС-35	0,18	$0,14 + j0,07$
4	5	Ф	АС-50	0,29	$0,17 + j0,11$
		N	АС-35	0,29	$0,22 + j0,12$
2	6	Ф	АС-50	0,42	$0,25 + j0,16$
		N	АС-35	0,42	$0,32 + j0,17$
6	7	Ф	АС-50	1,75	$1,04 + j0,67$
		N	АС-35	1,75	$1,35 + j0,71$
6	8	Ф	АС-50	0,47	$0,28 + j0,18$
		N	АС-35	0,47	$0,36 + j0,19$

Таблица 2

Режимные данные о нагрузках сети 0,38 кВ

Номер узла	Ток нагрузки, А		
	Фаза A	Фаза B	Фаза C
1	$2,8e^{-j31,79}$	$5,4e^{j88,21}$	$8,6e^{-j151,79}$
2	$3,8e^{-j31,79}$	$4,4e^{j88,21}$	$9,4e^{-j151,79}$
3	$2,4e^{-j31,79}$	0	$16,7e^{-j151,79}$
4	0	$2,4e^{j88,21}$	$5,2e^{-j151,79}$
5	0	$8,4e^{j88,21}$	$10e^{-j151,79}$
6	$3,2e^{-j31,79}$	$4,4e^{j88,21}$	0
7	0	$10e^{j88,21}$	0
8	$20e^{-j31,79}$	0	0

Токи в проводах на участках распределительной линии находятся по пункту 3 алгоритма. Например, для участка 0–1 имеем:

$$\underline{I}_{A01} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A3} + \underline{I}_{A6} + \underline{I}_{A8} = 2,80e^{-j31,79} + 3,80e^{-j31,79} + 2,40e^{-j31,79} + 3,20e^{-j31,79} + 20,00e^{-j31,79} = 32,20e^{-j31,79} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{B01} = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B3} + \underline{I}_{B4} + \underline{I}_{B6} + \underline{I}_{B7} = 5,40e^{j88,21} + 4,40e^{j88,21} + 2,40e^{j88,21} + 8,40e^{j88,21} + 4,40e^{j88,21} + 10,00e^{j88,21} = 35,00e^{j88,21} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{C01} = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C3} + \underline{I}_{C4} + \underline{I}_{C5} = 8,60e^{-j151,79} + 9,40e^{-j151,79} + 16,70e^{-j151,79} + 5,20e^{-j151,79} + 10,00e^{-j151,79} = 49,90e^{-j151,79} \text{ А}.$$

Ток в нулевом проводе (4)

$$\underline{I}_{N01} = \underline{I}_{A01} + \underline{I}_{B01} + \underline{I}_{C01} = 32,20e^{-j31,79} + 35,00e^{j88,21} + 49,90e^{-j151,79} = 16,48e^{-j160,25} \text{ А}.$$

Падения напряжения (8):

$$\underline{\Delta U}_{A01} = \underline{I}_{A01} \underline{Z}_{A01} + \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} = 32,20e^{-j31,79} (0,12 + j0,08) + 16,48e^{-j160,25} \cdot (0,15 + j0,08) = 3,29e^{-j38,09} \text{ В};$$

$$\underline{\Delta U}_{B01} = \underline{I}_{B01} \underline{Z}_{B01} + \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} = 35,00e^{j88,21} (0,12 + j0,08) + 16,48e^{-j160,25} \cdot (0,15 + j0,08) = 4,97e^{j154,80} \text{ В};$$

$$\underline{\Delta U}_{C01} = \underline{I}_{C01} \underline{Z}_{C01} + \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} = 49,90e^{-j151,79} (0,12 + j0,08) + 16,48e^{-j160,25} \cdot (0,15 + j0,08) = 9,85e^{-j122,94} \text{ В};$$

$$\underline{\Delta U}_{N01} = \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} = 16,48e^{-j160,25} \cdot (0,15 + j0,08) = 2,87e^{-j132,72} \text{ В}.$$

Напряжение в узле (9):

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A0} - \underline{\Delta U}_{A01} = 231,00e^{j0} - 3,29e^{-j38,09} = 228,42e^{j0,51} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{B1} = \underline{U}_{B0} - \underline{\Delta U}_{B01} = 231,00e^{j120,00} - 4,97e^{j154,80} = 226,94e^{j119,29} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{C1} = \underline{U}_{C0} - \underline{\Delta U}_{C01} = 231,00e^{-j120} - 9,85e^{-j122,94} = 221,17e^{-j119,87} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{N1} = \underline{U}_{N0} + \underline{\Delta U}_{N01} = 0 + 2,87e^{-j132,72} = 2,87e^{-j132,72} \text{ В}.$$

Потери активной мощности в проводах (10):

$$\Delta P_{A01} = I_{A01}^2 R_{A01} = 32,20^2 \cdot 0,12 = 124,42 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{B01} = I_{B01}^2 R_{B01} = 35,00^2 \cdot 0,12 = 147,00 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{C01} = I_{C01}^2 R_{C01} = 49,90^2 \cdot 0,12 = 298,80 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{N01} = I_{N01}^2 R_{N01} = 16,48^2 \cdot 0,15 = 40,74 \text{ кВт}.$$

Потери активной мощности в схеме сети:

$$\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + \Delta P_N = 498,56 + 478,47 + 785,81 + 698,21 = 2461,05 \text{ кВт}.$$

Расчеты по остальным участкам рассматриваемой РЛ без учета влияния повторного заземления нулевого провода проводятся аналогично, а их результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета режима схемы РЛ (рис. 1)
без учета повторного заземления нулевого провода

Номер узла начала ветви	Номер узла конца ветви		Токи участков, А	Падение напряжения, В	Потери мощности, Вт	Напряжение узла конца ветви
0	1	A	$32,20e^{-j31,79}$	$3,29e^{-j38,09}$	124,42	$228,42e^{j0,51}$
		B	$35,00e^{j88,21}$	$4,97e^{j1154,80}$	147,00	$226,94e^{j119,29}$
		C	$49,90e^{-j151,79}$	$9,85e^{-j122,94}$	298,80	$221,17e^{-j119,87}$
		N	$16,48e^{-j160,25}$	$2,87e^{-j132,72}$	40,74	$2,87e^{-j132,72}$
1	2	A	$29,40e^{-j31,79}$	$4,21e^{-j28,52}$	127,93	$224,75e^{j1,03}$
		B	$29,60e^{j88,21}$	$4,79e^{j150,45}$	129,67	$222,86e^{j118,65}$
		C	$41,30e^{-j151,79}$	$9,84e^{-j120,56}$	211,33	$200,33e^{-j119,84}$
		N	$11,80e^{-j152,63}$	$2,57e^{-j125,09}$	26,91	$5,43e^{-j129,12}$
2	3	A	$2,40e^{-j31,79}$	$6,93e^{-j137,50}$	1,09	$229,99e^{j2,17}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$7,38e^{-j159,33}$	22,10	$221,95e^{j116,76}$
		C	$31,90e^{-j151,79}$	$14,28e^{-j129,74}$	192,78	$197,28e^{-j119,12}$
		N	$26,33e^{-j167,83}$	$7,34e^{-j140,30}$	171,42	$12,72e^{-j135,54}$
3	4	A	0	$2,13e^{j167,92}$	0	$232,08e^{j2,26}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$2,88e^{j165,34}$	12,43	$220,06e^{j116,20}$
		C	$15,20e^{-j151,79}$	$3,69e^{-j144,71}$	24,62	$193,96e^{-j118,65}$
		N	$13,55e^{j164,55}$	$2,13e^{-j167,92}$	25,53	$14,56e^{-j140,03}$
4	5	A	0	$2,35e^{j175,69}$	0	$234,43e^{j2,28}$
		B	$8,40e^{j88,21}$	$3,48e^{j158,18}$	12,11	$217,48e^{j115,59}$
		C	$10,00e^{-j151,79}$	$3,87e^{-j149,5}$	17,17	$190,64e^{-j118,06}$
		N	$9,30e^{j156,78}$	$2,35e^{-j175,69}$	19,40	$16,53e^{-j144,79}$
2	6	A	$23,20e^{-j31,79}$	$13,72e^{j18,02}$	133,83	$211,67e^{-j0,06}$
		B	$14,40e^{j88,21}$	$8,73e^{j62,86}$	51,56	$218,07e^{j120,55}$
		C	—	—	—	—
		N	$20,29e^{j6,15}$	$7,43e^{j33,68}$	133,60	$2,75e^{-j2,01}$
6	7	A	—	—	—	—
		B	$10,00e^{j88,21}$	$27,56e^{j118,11}$	103,60	$190,54e^{j120,90}$
		C	—	—	—	—
		N	$10,00e^{j88,21}$	$15,26e^{j115,75}$	135,27	$14,18e^{j105,85}$
6	8	A	$20,00e^{-j31,79}$	$14,80e^{-j1,89}$	111,30	$196,88e^{-j0,08}$
		B	—	—	—	—
		C	—	—	—	—
		N	$20,00e^{-j31,79}$	$8,19e^{-j4,25}$	145,32	$10,95e^{-j3,69}$
ИТОГО		A	—	—	498,56	—
		B	—	—	478,47	—
		C	—	—	785,81	—
		N	—	—	698,21	—

Распределительные электрические сети 0,38 кВ традиционно имеют разомкнутую древовидную топологию и из-за резко несимметричных режимов работы, помимо фазных проводов, обязательно снабжаются дополнительным нулевым проводом, в котором замыкаются токи нулевой последовательности. Нулевой провод соединяет заземленные нейтралы обмоток низкого напряжения питающих трансформаторов в ТП 6-20/0,38 кВ с нейтралями трехфазных и обратными проводами однофазных потребителей. Конструктивно прокладка нулевых проводов линий в воздушном, кабельном или ином исполнении осуществляется совместно с фазными проводами. Поэтому, если рассматривать сеть нулевого провода отдельно от сети фазных проводов, то при ее заземлении только в нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора ТП 6-20/0,38 кВ сеть нулевого провода будет иметь разомкнутую древовидную топологию, как и фазная сеть. В этом случае для определения токов, напряжений и потерь мощности в сети нулевого провода может быть использован хорошо разработанный математический аппарат расчета разомкнутых распределительных электрических сетей [1, 4].

Учет повторного заземления, устанавливаемого в сети нулевого провода согласно ПУЭ [3], приводит к появлению в схеме замещения дополнительных ветвей, связывающих нулевой провод с землей (рис. 3). При наличии обязательного заземления нулевого провода в нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора ТП 6-20/0,38 кВ появляющиеся ветви повторного заземления создают в схеме контуры, связанные с землей, и топология сети нулевого провода становится замкнутой. Учитывая низкий уровень достоверности режимной информации о потребителях и невысокое напряжение сети, сложностью природы растекания токов нулевой последовательности в земле, с достаточной для практических расчетов точностью, можно пренебречь и землю считать узлом схемы замещения сети, соединенным с нулевым проводом ветвями, имитирующими заземляющие устройства. С учетом принятых допущений схема замещения сети нулевого провода для распределительной линии 0,38 кВ (рис. 1) будет иметь вид, показанный на рис. 3.

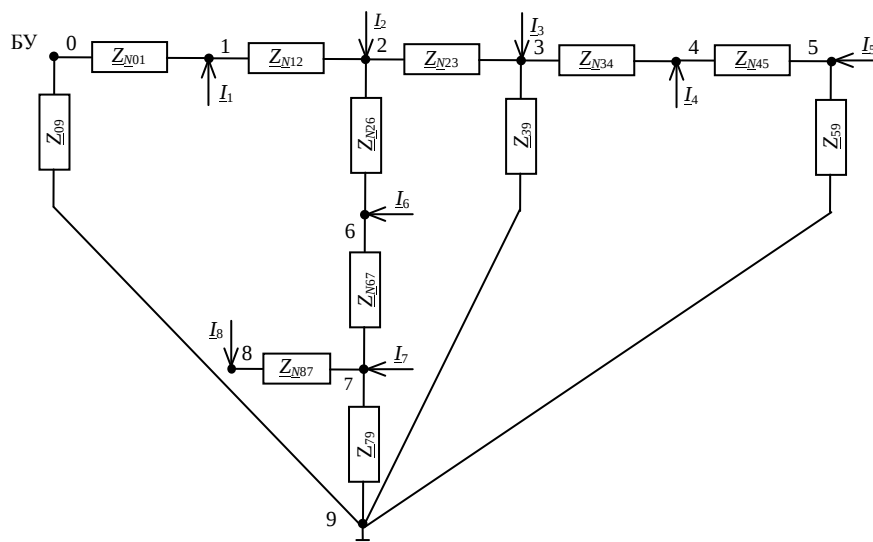


Рис. 3. Схема замещения сети нулевого провода

В этой схеме узел 9 имитирует землю, ветви 0–9, 7–9 и 5–9 – сопротивления растеканию заземляющих устройств.

Узел 0 в схеме замещения (рис. 3) соответствует нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора ТП 6-20/0,38 кВ с нулевым потенциалом. Схема получает питание от источников тока в узлах подключения нагрузок. Величины токов источников в каждом узле определяются суммой фазных токов нагрузки.

Учитывая замкнутую топологию схемы замещения для расчета режима сети нулевого провода с учетом повторных заземлений, требуется несколько иной математический аппарат по сравнению с принятым для разомкнутых сетей. Наиболее совершенным и хорошо разработанным для решения подобных задач является метод узловых напряжений [4]. Задача существенно упрощается при представлении режимной информации об узлах сети в форме токовых инъекций. Система уравнений узловых напряжений в этом случае становится линейной и однозначно разрешимой относительно напряжений узловых точек схемы нулевого провода. В качестве базисно-балансирующего узла удобно принять узел, соответствующий нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора в ТП 6-20/0,38 кВ, имеющий при симметричном напряжении нулевой потенциал.

Уравнения узловых напряжений для схемы замещения сети нулевого провода с учетом повторных заземлений при нулевом потенциале балансирующего узла выглядят следующим образом [4]:

$$\left. \begin{aligned} \underline{y}_{11}\underline{U}_1 - \underline{y}_{12}\underline{U}_2 - \underline{y}_{13}\underline{U}_3 - \dots - \underline{y}_{1i}\underline{U}_i &= \underline{I}_1; \\ -\underline{y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{y}_{22}\underline{U}_2 - \underline{y}_{23}\underline{U}_3 - \dots - \underline{y}_{2i}\underline{U}_i &= \underline{I}_2; \\ -\underline{y}_{31}\underline{U}_1 - \underline{y}_{32}\underline{U}_2 + \underline{y}_{33}\underline{U}_3 - \dots - \underline{y}_{3i}\underline{U}_i &= \underline{I}_3; \\ \vdots & \\ -\underline{y}_{i1}\underline{U}_1 - \underline{y}_{i2}\underline{U}_2 - \underline{y}_{i3}\underline{U}_3 - \dots + \underline{y}_{ii}\underline{U}_i &= \underline{I}_i, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $\underline{y}_{ij}$ ($i = 1, 2, 3, \dots; j = 1, 2, 3, \dots; i \neq j$) – взаимная проводимость узлов i и j , равная сумме комплексных проводимостей ветвей, соединяющих эти узлы, или нулю, если узлы в схеме не связаны; $\underline{y}_{ii}$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) – собственная проводимость i -го узла, равная сумме комплексных проводимостей всех присоединенных ветвей, включая ветви, связывающие узел с балансирующим узлом в схеме; $\underline{U}_i$ – комплексное узловое напряжение, равное разности потенциалов i -го и балансирующего узлов схемы; $\underline{I}_i$ – комплексный задающий ток i -го узла.

Уравнения вида (13) составляются для каждого узла схемы замещения, кроме балансирующего.

Систему уравнений узловых напряжений (13) можно представить в матричном виде

$$\underline{Y}_y \underline{U} = \underline{I}, \quad (14)$$

где $\underline{Y}_y$ – комплексная матрица собственных и взаимных узловых проводимостей, в которой отсутствуют строка и столбец, соответствующие баланси-

рующему узлу схемы; $\underline{U}$ и $\underline{I}$ – векторы-столбцы комплексов узловых напряжений и токов.

В системе уравнений (14) неизвестными являются узловые напряжения сети нулевого провода. Так как большинство недиагональных элементов матрицы $\underline{Y}_y$ равны нулю, для решения системы линейных уравнений (14) эффективно использовать точные методы, учитывающие топологические особенности графа решаемой системы уравнений. Наиболее широко применяемым в практике расчетов является метод Гаусса с оптимальной стратегией упорядочивания при исключении неизвестных [5].

В качестве примера рассмотрим расчет режима нулевого провода распределительной линии 0,38 кВ (рис. 1) с учетом повторных заземлений в узлах 3, 5 и 7. Схема замещения сети нулевого провода рассматриваемой линии с учетом повторных заземлений представлена на рис. 3. Сопротивление заземляющего устройства, присоединенного к нейтрали трансформаторов для линейного напряжения 0,38 кВ, согласно [3, п. 1.7.62], должно быть не более 4 Ом, а сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений согласно [3, п. 1.7.64] – не более 30 Ом, причем их общее сопротивление – не более 10 Ом. В примере сопротивление заземляющего устройства, присоединенного к нейтрали трансформатора, принято равным 2 Ом, а сопротивления повторных заземлений – 10 Ом.

По данным табл. 3 вычислим комплексные токи инъекций нагрузок $I_{N1}, \dots, I_{N8}$ в сеть нулевого провода, из которых будет состоять вектор-столбец задающих токов $\underline{I}$ в схеме замещения на рис. 3:

$$I_{N1} = I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} = 2,80e^{-j31,79} + 5,40e^{j88,21} + 8,60e^{-j151,79} = 5,33e^{-j157,39} \text{ A};$$

$$I_{N2} = I_{A2} + I_{B2} + I_{C2} = 3,80e^{-j31,79} + 4,40e^{j88,21} + 9,40e^{-j151,79} = 5,03e^{-j178,37} \text{ A};$$

$$I_{N3} = I_{A3} + I_{C3} = 2,40e^{-j31,79} + 16,70e^{-j151,79} = 15,64e^{-j144,15} \text{ A};$$

$$I_{N4} = I_{B4} + I_{C4} = 2,40e^{j88,21} + 5,20e^{-j151,79} = 4,51e^{-j179,25} \text{ A};$$

$$I_{N5} = I_{B5} + I_{C5} = 8,40e^{-j88,21} + 10,00e^{-j151,79} = 9,30e^{j156,78} \text{ A};$$

$$I_{N6} = I_{A6} + I_{B6} = 3,20e^{-j31,79} + 4,40e^{j88,21} = 3,94e^{j43,51} \text{ A};$$

$$I_{N7} = I_{B7} = 10,00e^{j88,21} \text{ A};$$

$$I_{N8} = I_{A8} = 20,00e^{-j31,79} \text{ A}.$$

Матрица узловых проводимостей $\underline{Y}_y$ для схемы рис. 3 имеет следующую структуру:

$$\underline{Y}_y = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} & -\underline{y}_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{y}_{12} & \underline{y}_{22} & -\underline{y}_{23} & 0 & 0 & -\underline{y}_{26} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\underline{y}_{23} & \underline{y}_{33} & -\underline{y}_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{39} \\ 0 & 0 & -\underline{y}_{34} & \underline{y}_{44} & -\underline{y}_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{45} & \underline{y}_{55} & 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{59} \\ 0 & -\underline{y}_{26} & 0 & 0 & 0 & \underline{y}_{66} & -\underline{y}_{67} & -\underline{y}_{68} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{67} & \underline{y}_{77} & 0 & -\underline{y}_{79} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{68} & 0 & \underline{y}_{88} & 0 \\ 0 & 0 & -\underline{y}_{39} & 0 & -\underline{y}_{59} & 0 & -\underline{y}_{79} & 0 & \underline{y}_{99} \end{bmatrix}.$$

Вычислим элементы матрицы $\underline{Y}_y$. Собственные проводимости узлов равны:

$$y_{11} = \frac{1}{z_{N01}} + \frac{1}{z_{N12}} = \frac{1}{0,15 + j0,08} + \frac{1}{0,19 + j0,10} = 9,15 - j4,77 \text{ См};$$

$$y_{22} = \frac{1}{z_{N12}} + \frac{1}{z_{N23}} + \frac{1}{z_{N26}} = \frac{1}{0,19 + j0,10} + \frac{1}{0,25 + j0,13} + \frac{1}{0,32 + j0,17} = 9,67 - j5,04 \text{ См};$$

$$y_{33} = \frac{1}{z_{N23}} + \frac{1}{z_{N34}} + \frac{1}{z_{39}} = \frac{1}{0,25 + j0,13} + \frac{1}{0,14 + j0,07} + \frac{1}{10,00 + j0} = 8,93 - j4,60 \text{ См};$$

$$y_{44} = \frac{1}{z_{N34}} + \frac{1}{z_{N45}} = \frac{1}{0,14 + j0,07} + \frac{1}{0,22 + j0,12} = 9,16 - j4,77 \text{ См};$$

$$y_{55} = \frac{1}{z_{N45}} + \frac{1}{z_{59}} = \frac{1}{0,22 + j0,12} + \frac{1}{10,00 + j0} = 3,61 - j1,83 \text{ См};$$

$$y_{66} = \frac{1}{z_{N26}} + \frac{1}{z_{N67}} + \frac{1}{z_{N68}} = \frac{1}{0,32 + j0,17} + \frac{1}{1,35 + j0,71} + \frac{1}{0,36 + j0,19} = 5,17 - j2,69 \text{ См};$$

$$y_{77} = \frac{1}{z_{N67}} + \frac{1}{z_{79}} = \frac{1}{1,35 + j0,71} + \frac{1}{10,00 + j0} = 0,68 - j0,30 \text{ См};$$

$$y_{88} = \frac{1}{z_{N68}} = \frac{1}{0,36 + j0,19} = 2,16 - j1,13 \text{ См};$$

$$y_{99} = \frac{1}{z_{09}} + \frac{1}{z_{39}} + \frac{1}{z_{59}} + \frac{1}{z_{79}} = \frac{1}{2,00 + j0} + \frac{1}{10,00 + j0} + \frac{1}{10,00 + j0} + \frac{1}{10,00 + j0} = 0,80 + j0 \text{ См.}$$

Взаимные проводимости узлов:

$$y_{12} = \frac{-1}{z_{N12}} = \frac{-1}{0,19 + j0,1} = -4,07 + j2,12 \text{ См;}$$

$$y_{23} = \frac{-1}{z_{N23}} = \frac{-1}{0,25 + j0,13} = -3,18 + j1,66 \text{ См;}$$

$$y_{26} = \frac{-1}{z_{N26}} = \frac{-1}{0,32 + j0,17} = -2,42 + j1,26 \text{ См;}$$

$$y_{34} = \frac{-1}{z_{N34}} = \frac{-1}{0,14 + j0,07} = -5,65 + j2,95 \text{ См;}$$

$$y_{45} = \frac{-1}{z_{N45}} = \frac{-1}{0,22 + j0,12} = -3,51 + j1,83 \text{ См;}$$

$$y_{67} = \frac{-1}{z_{N67}} = \frac{-1}{1,35 + j0,71} = -0,58 + j0,30 \text{ См;}$$

$$y_{68} = \frac{-1}{z_{N68}} = \frac{-1}{0,36 + j0,19} = -2,16 + j1,13 \text{ См;}$$

$$y_{39} = \frac{-1}{z_{N39}} = \frac{-1}{10,00} = -0,10 + j0 \text{ См;}$$

$$y_{59} = \frac{-1}{z_{N59}} = \frac{-1}{10,00} = -0,10 + j0 \text{ См;}$$

$$y_{79} = \frac{-1}{z_{N79}} = \frac{-1}{10,00} = -0,10 + j0 \text{ См.}$$

В результате решения системы линейных уравнений (14) определяем вектор-столбец комплексных напряжений в узлах нулевого провода относительно потенциала нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора в ТП 6-20/0,38 кВ, зная которые легко находятся токи, падения напряжения и потери мощности в ветвях нулевого провода:

$$U_{N1} = 2,62e^{-j131,77} \text{ В;}$$

$$U_{N2} = 4,86e^{-j127,55} \text{ В;}$$

$$U_{N3} = 11,61e^{-j136,58} \text{ B};$$

$$U_{N4} = 13,30e^{-j141,67} \text{ B};$$

$$U_{N5} = 15,04e^{-j147,23} \text{ B};$$

$$U_{N6} = 3,41e^{-j2,51} \text{ B};$$

$$U_{N7} = 12,12e^{-j101,49} \text{ B};$$

$$U_{N8} = 11,61e^{-j3,74} \text{ B}.$$

$$\Delta U_{N01} = U_{N1} = 2,62e^{-j131,77} \text{ B};$$

$$\Delta U_{N12} = U_{N2} - U_{N1} = 4,86e^{-j127,55} - 2,62e^{-j131,77} = 2,26e^{-j122,67} \text{ B};$$

$$\Delta U_{N23} = U_{N3} - U_{N2} = 11,61e^{-j136,58} - 4,86e^{-j127,55} = 6,85e^{-j142,98} \text{ B};$$

$$\Delta U_{N34} = U_{N4} - U_{N3} = 13,30e^{-j141,67} - 11,61e^{-j136,58} = 2,02e^{-j172,35} \text{ B};$$

$$\Delta U_{N45} = U_{N5} - U_{N4} = 15,04e^{-j147,23} - 13,30e^{-j141,67} = 2,22e^{j177,23} \text{ B};$$

$$\Delta U_{N26} = U_{N6} - U_{N2} = 3,41e^{-j2,51} - 4,86e^{-j127,55} = 7,37e^{j30,18} \text{ B};$$

$$\Delta U_{N67} = U_{N7} - U_{N6} = 12,12e^{-j101,49} - 3,41e^{-j2,51} = 13,36e^{j115,84} \text{ B};$$

$$\Delta U_{N68} = U_{N8} - U_{N6} = 11,61e^{-j3,74} - 3,41e^{-j2,51} = 8,19e^{-j4,25} \text{ B}.$$

$$I_{N01} = \Delta U_{N01} \frac{1}{z_{N01}} = 2,62e^{-j131,77} \cdot \frac{1}{0,15 + j0,08} = 15,01e^{-j159,31} \text{ A};$$

$$I_{N12} = \Delta U_{N12} y_{12} = 2,26e^{-j122,67} \cdot (-4,07 + j2,12) = 10,38e^{-j150,20} \text{ A};$$

$$I_{N23} = \Delta U_{N23} y_{23} = 6,85 \cdot e^{-j142,98} \cdot (-3,18 + j1,66) = 24,55e^{-j170,52} \text{ A};$$

$$I_{N34} = \Delta U_{N34} y_{34} = 2,02e^{-j172,35} \cdot (-5,65 + j2,95) = 12,85e^{j160,12} \text{ A};$$

$$I_{N45} = \Delta U_{N45} y_{45} = 2,22e^{j177,23} \cdot (-3,51 + j1,83) = 8,78e^{j149,70} \text{ A};$$

$$I_{N26} = \Delta U_{N26} y_{26} = 7,37e^{j30,18} \cdot (-2,42 + j1,26) = 20,14e^{j2,65} \text{ A};$$

$$I_{N67} = \Delta U_{N67} y_{67} = 13,36e^{j115,84} \cdot (-0,58 + j0,30) = 8,76e^{j88,30} \text{ A};$$

$$I_{N68} = \Delta U_{N68} y_{68} = 8,19e^{-j4,25} \cdot (-2,16 + j1,13) = 20,00e^{-j31,79} \text{ A}.$$

После расчета режима нулевого провода распределительной линии 0,38 кВ определяются напряжения фазных проводов в узлах подключения нагрузки.

Таблица 4

Результаты расчета режима схемы РЛ (рис. 1)
с учетом повторного заземления нулевого провода

Номер узла начала ветви	Номер узла конца ветви		Токи ветвей, А	Падения напряжения, В	Потери мощности, Вт	Напряжение узла конца ветви
0	1	A	$32,20e^{-j31,79}$	$3,36e^{-j33,79}$	124,42	$228,21e^{j0,47}$
		B	$35,00e^{j88,21}$	$4,85e^{j152,06}$	147,00	$226,90e^{j119,35}$
		C	$49,90e^{-j151,79}$	$9,60e^{-j122,42}$	298,80	$221,41e^{-j119,90}$
		N	$15,01e^{-j159,31}$	$2,62e^{-j131,77}$	33,79	$2,62e^{-j131,77}$
1	2	A	$29,40e^{-j31,79}$	$4,35e^{-j24,59}$	127,93	$224,28e^{j0,94}$
		B	$29,60e^{j88,21}$	$4,67e^{j146,77}$	129,67	$222,76e^{j118,80}$
		C	$41,30e^{-j151,79}$	$9,53e^{-j119,84}$	211,33	$211,87e^{-j119,90}$
		N	$10,38e^{-j150,20}$	$2,26e^{-j122,67}$	20,84	$4,86e^{-j127,55}$
2	3	A	$2,40e^{-j31,79}$	$6,42e^{-j140,15}$	1,09	$229,31e^{j1,95}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$7,03e^{j163,15}$	22,10	$221,42e^{j117,02}$
		C	$31,90e^{-j151,79}$	$13,73e^{-j130,67}$	192,78	$198,40e^{-j119,16}$
		N	$24,55e^{-j170,52}$	$6,85e^{-j142,98}$	149,06	$11,61e^{-j136,58}$
3	4	A	0	$2,02e^{-j172,35}$	0	$231,32e^{j2,00}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$2,85e^{j161,51}$	12,43	$219,39e^{j116,50}$
		C	$15,20e^{-j151,79}$	$3,52e^{-j146,30}$	24,62	$195,27e^{-j118,69}$
		N	$12,85e^{j160,12}$	$2,02e^{-j172,35}$	22,98	$13,30e^{-j141,67}$
4	5	A	0	$2,22e^{j177,23}$	0	$233,53e^{j1,95}$
		B	$8,40e^{j88,21}$	$3,48e^{j153,04}$	12,11	$216,60e^{j115,95}$
		C	$10,00e^{-j151,79}$	$3,62e^{j152,34}$	17,17	$192,27e^{-j118,09}$
		N	$8,78e^{j149,70}$	$2,22e^{j177,23}$	17,27	$15,04e^{-j147,23}$
2	6	A	$23,20e^{-j31,79}$	$13,78e^{j16,15}$	133,83	$211,01e^{-j0,04}$
		B	$14,40e^{j88,21}$	$8,46e^{j60,42}$	51,56	$218,45e^{j120,69}$
		C	—	—	—	—
		N	$20,14e^{j2,65}$	$7,37e^{j30,18}$	131,67	$3,41e^{-j2,51}$
6	7	A	—	—	—	—
		B	$10,00e^{j88,21}$	$25,66e^{j118,34}$	103,60	$192,81e^{j121,00}$
		C	—	—	—	—
		N	$8,76e^{j88,30}$	$13,36e^{j115,84}$	103,77	$12,12e^{j101,49}$
6	8	A	$20,00e^{-j31,79}$	$14,8e^{-j1,89}$	111,30	$196,22e^{j0,10}$
		B	—	—	—	—
		C	—	—	—	—
		N	$20,00e^{-j31,79}$	$8,19e^{-j4,25}$	145,32	$11,61e^{-j3,74}$
ИТОГО		A	—	—	498,56	
		B	—	—	478,47	
		C	—	—	785,81	
		N	—	—	624,71	

Анализ данных, приведенных в табл. 3, 4, показал следующее. При учете повторного заземления токи в нулевом проводе в большинстве случаев уменьшились. Их значения были: соответственно по ветвям схемы 16,48; 11,80; 26,33; 13,55; 9,30; 20,29; 10,00 и 20,00 А, стали 15,01; 10,38; 24,55; 12,85; 8,78; 20,14; 8,76 и 20,00 А, что привело к снижению суммарных потерь мощности в нулевом проводе более чем на 10 %, с 698,21 до

624,71 кВт. Токораспределение в фазных проводах остается без изменения. Снижается и выравнивается несимметрия фазных напряжений, например, в узле 5 модули напряжений фаз *A, B, C* были соответственно 234,43; 217,48 и 190,64 В, стали 233,53; 216,60 и 192,27 В.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика учета повторного заземления нулевого провода при расчете режимов и потерь в сетях 0,38 кВ с использованием метода узловых напряжений, позволяющая уточнять режимные параметры нулевого провода.

2. Учет повторного заземления нулевого провода оказывает влияние на параметры режима и потери мощности в сети 0,38 кВ, причем сила влияния пропорциональна степени несимметрии токов нагрузки фаз и обратно пропорциональна сопротивлению заземляющих устройств и заземлителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф у р с а н о в, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 207 с.
2. Б у д з к о, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль. – М.: Агропромиздат, 1990. – 496 с.
3. П р а в и л а устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.
4. И д е л ь ч и к, В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / В. И. Идельчик; под ред. В. А. Веникова. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.
5. Б р а м е л л е р, А. Слабозаполненные матрицы: анализ электроэнергетических систем / А. Брамеллер, Р. Алан, Я. Хэмэм; пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 192 с.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 6.06.2007

УДК 534.2

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС РЕГИСТРАЦИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**ОВЧИННИКОВ В. И., доктора техн. наук ДОРОШКЕВИЧ Е. А.,
УШЕРЕНКО С. М., КАЛИНИЧЕНКО А. С.**

*ГНУ НИИ ПМ ОХП «Научно-исследовательский институт импульсных процессов
с опытным производством»,
Белорусский национальный технический университет*

Для получения новых материалов с уникальными свойствами нередко используется энергия взрыва, например при сварке разнородных материалов