ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XII, № 2, 1959 Серия технических наук

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г. Г. КОСТАНЯН

К ТЕОРИИ СЛОЖНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

За последние годы опубликован ряд ценных работ, посвященных упрощению расчета сложных несимметричных повреждений в электрических системах [1, 2, 3, 4, 5, 6 и др.]. Разработанные методы расчета позволяют исследовать комбинации любых сложных повреждений. Однако, они тем более трудоемки, чем сложнее рассматриваемые сети. В результате этого для сложных сетей с большим числом кольцевых связей расчеты оказываются громоздкими и не без затруднений осваиваются в энергосистемах [8].

Между тем, они могут быть значительно упрощены, если трактовать их как продолжение расчетов простейших несимметричных повреждений, как это было описано в [9] применительно к различным комбинациям к. з. (короткое замыкание) с разрывом одной фазы. При таком подходе, в отличие от рекомендуемого в [1], наиболее трудоемкую часть расчета можно выполнять с помощью модели постоянного тока, используя схемы уже выполненных расчетов простейших несимметричных повреждений (комплексные, составленные по месту к. з., или выделенные друг от друга) вместе с уже вычисленными в них токами и напряжениями. Изменения, вносимые вторым повреждением в схеме каждой последовательности, могут учитываться при этом на модели постоянного тока только двумя эдс $\Delta \dot{E}_{\kappa i}$, изменяющей напряжение в месте первого повреждения, и эдс $\Delta \dot{E}_{yi}$ — в месте второго повреждения.

Ниже описаны свойства четырехполюсников и основные положения, на которых базируется предлагаемый метод расчета применительно к расчетам коротких замыканий в двух точках сети. Здесь имеются в виду приведенные в табл. 3 различные комбинации одно-, двух- и трехфазных замыканий на землю.

Свойства четырехполюсников

1) На основании принципа взаимности [7] можно убедиться, что в четырехполюснике с линейными параметрами соблюдаются следующие соотношения:

$$\frac{\dot{I}_{\kappa}}{\dot{I}} = \frac{\dot{E}_{y}}{\dot{E}} = \frac{Z_{y}}{Z_{y\kappa}} = \dot{\alpha}, \qquad (1)$$

где $\dot I$, $\dot E$ — токи и эдс источников, $\dot I_к$ и $\dot E_у$ — токи и эдс в свободных от источников ветвях одного и того же четырехполюсника, показанного на рис. 1 и рис. 2; $Z_у$ — входное сопротивление ветви $(у-у')$; $Z_{ук}$ — взаимное сопротивление между ветвями $(у-у')$ и $(k-k')$.

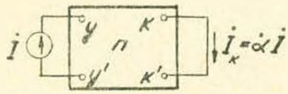


Рис. 1.

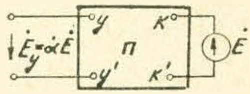


Рис. 2.

Коэффициент $\dot\alpha$ на рис. 1 определяет долю тока в ветви $k-k'$ от полного тока в ветви $у-у'$, а на рис. 2 — долю эдс в ветви $у-у'$ от полной эдс в ветви $k-k'$.

Учитывая выражение (1) и сравнивая токи $\dot I_у$ на рис. 3а и 3б, можно убедиться, что исключение эдс из ветви $k-k'$ рис. 3а и перенос ее в ветвь $у-у'$ в виде $\dot\alpha\dot E$ не изменит тока в ветви $у-у'$.

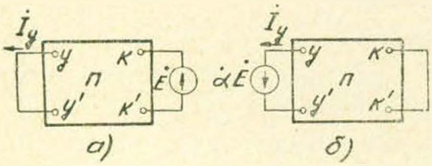


Рис. 3.

Аналогично коэффициенту $\dot\alpha$, учитывающему связь между ветвями $у-у'$ и $k-k'$ рассматриваемого четырехполюсника, может быть найден коэффициент

$$\dot\beta = \frac{Z_к}{Z_{ук}}, \qquad (2)$$

где $Z_к$ — входное сопротивление ветви $k-k'$, а $Z_{ку} = Z_{ук}$.

Коэффициент $\dot\beta$ для ветви $k-k'$ представляет собой то же, что и коэффициент $\dot\alpha$ для ветви $у-у'$, однако определяет распределение токов и напряжений между ветвями $k-k'$ и $у-у'$ в направлении, обратном тому, которое принимается для $\dot\alpha$.

$\dot\alpha$ и $\dot\beta$ представляют величины, обратные известным коэффициентам четырехполюсника и связаны следующим соотношением:

$$\dot\alpha Z_к = \dot\beta Z_у = pZ_кZ_у. \qquad (3)$$

2) Входные сопротивления $Z_к$ и $Z_у$ и проводимости $Y_к$ и $Y_у$ ветвей $k-k'$ и $у-у'$ четырехполюсника в режиме, показанном на рис. 1, связаны с входными сопротивлениями $Z'_к$ и $Z'_у$ и проводимостями $Y'_к$ и $Y'_у$ того же четырехполюсника в режиме, показанном на рис. 4, следующими соотношениями:

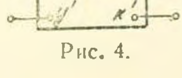


Рис. 4.

$$Z_у = Z'_у(1-\dot\alpha\dot\beta); \quad Z_к = Z'_к(1-\dot\alpha\dot\beta) \qquad (4)$$

или

$$Z'_у = Z_у + \dot\alpha^2 Z'_к; \quad Z'_к = Z_к + \dot\beta^2 Z'_у \qquad (5)$$

$$\dot{Y}_y = \dot{Y}'_y + \dot{\beta}^2 \dot{Y}_\kappa; \; \dot{Y}_\kappa = \dot{Y}'_\kappa + \dot{\alpha}^2 \dot{Y}_y \tag{6}$$

поэтому

$$Z'_\kappa \dot{\alpha} = Z'_y \dot{\beta}. \tag{7}$$

3) При включении сопротивления Z_m в одну из ветвей четырехполюсника (напр., в ветвь $k - k'$, как это показано на рис. 5) сопротивление второй ветви составит:

$$Z_{yg} = Z'_y - \dot{\alpha}^2 \dot{n} Z_\kappa = Z_y + \dot{\alpha}^2 \dot{m} Z'_\kappa, \tag{8}$$

где

$$\dot{n} = \frac{Z'_\kappa}{Z'_\kappa + Z_g}; \; \dot{m} = \frac{Z_g}{Z'_\kappa + Z_g}; \; \dot{m} + \dot{n} = 1.$$

Выражения (5) — (8) определяют изменения, вносимые коротким замыканием, разрывом или введением сопротивления в любую ветвь сложной линейной сети, и используются для упрощения расчетов рассматриваемых сложных повреждений.

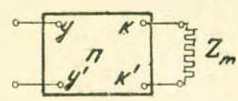


Рис. 5.

Условимся в дальнейшем величины, относящиеся к ветви первого к. з., обозначать индексом k, к ветви второго к. з. — индексом y, к соответствующим фазам — индексами A, B и C, к соответствующим последовательностям — индексами 1, 2, 0, к любой последовательности — индексом i, к замыканию на землю трех фаз — индексом (3), двух фаз — (1,1), одной фазы (1).

Определение коэффициентов α и β из расчетов простейших несимметричных повреждений

Применительно к рассматриваемым к. з., коэффициенты α и β между ветвями $k - k$ и $y - y'$ двух повреждений в схеме каждой последовательности удобно определять, используя результаты уже выполненных расчетов простейших к. з.

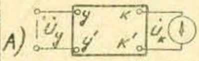
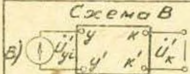
В табл. 1 приведены исходные схемы A и B, а также выражения, определяющие $\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$ указанным выше способом. Схема A служит для определения коэффициента $\dot{\alpha}$, а схема B — для нахождения коэффициента $\dot{\beta}$.

$\dot{U}_{yi}$ в схеме A обозначает напряжение в точке y при к. з. в точке k, а $\dot{U}_{\kappa i}$ — в схеме B напряжение в точке k при к. з. в точке y; $\dot{U}_{\kappa i}$ и $\dot{U}_{\kappa i}$ обозначают соответственно напряжения в месте к. з.

Как видно из приведенных в табл. 1 выражений, коэффициенты $\dot{\alpha}_1$ и $\dot{\beta}_1$ определяются в предположении, что эдс генераторов равны нулю и только в месте к. з. действуют напряжения $\dot{U}_{\kappa 1}$ (в схеме A) и $\dot{U}_{y1}$ (в схеме B).

В табл. 1 приведены также выражения, определяющие сумму коэффициентов $\dot{\alpha}$. Аналогичные выражения могут быть получены для

Таблица 1

Коэффициенты α и β между ветвью „К-К'" и ветвью „У-У'"				
Исходные схемы для каждой последовательности	Коэффициенты в схемах отдельных последовательностей			Суммы коэффициентов
	Прямой	Обратный	Нулевой	
Схема А А)  данные из расчета К. З. в точке „К"	$\dot{\alpha}_1 = \frac{\dot{U}_{y1} - \dot{U}_y^{(3)}}{\dot{U}_{k1}}$	$\dot{\alpha}_2 = \frac{\dot{U}_{y2}}{\dot{U}_{k2}}$	$\dot{\alpha}_0 = \frac{\dot{U}_{y0}}{\dot{U}_{k0}}$	$\dot{\alpha}_1 + \dot{\alpha}_2 + \dot{\alpha}_0 = \frac{3(\dot{U}_{yA}^{(1.1)} - \dot{U}_y^{(3)})}{\dot{U}_{kA}^{(1.1)}}$ $a^2\dot{\alpha}_1 + a\dot{\alpha}_2 + \dot{\alpha}_c = \frac{3(\dot{U}_{yB}^{(1.1)} - a^2\dot{U}_y^{(3)})}{\dot{U}_{kA}^{(1.1)}}$ $a\dot{\alpha}_1 + a^2\dot{\alpha}_2 + \dot{\alpha}_0 = \frac{3(\dot{U}_{yC}^{(1.1)} - a\dot{U}_y^{(3)})}{\dot{U}_{kA}^{(1.1)}}$
Схема В В)  данные из расчета К. З. в точке „У"	$\dot{\beta}_1 = \frac{\dot{U}'_{k1} - \dot{U}'^{(3)}_k}{\dot{U}'_{y1}}$	$\dot{\beta}_2 = \frac{\dot{U}'_{k2}}{\dot{U}'_{y2}}$	$\dot{\beta}_0 = \frac{\dot{U}'_{k0}}{\dot{U}'_{y0}}$	

Примечание: 1. $\dot{U}_{yi}, \dot{U}_{ki}, \dot{U}'_{yi}, \dot{U}'_{ki}$ могут заимствоваться из расчета любого вида несимметричного К. З.

2. $\dot{U}_y^{(3)}$ – обозначает напряжение между „У-У'" при трехфазном К. З. в точке „К", а $\dot{U}'^{(3)}_k$ – тоже между „К-К'" при трехфазном К. З. в точке „У".

3. Сумма коэффициентов β отличается от суммы коэффициента α только обозначениями (заменяется $\dot{U}_y^{(1.1)}$, $\dot{U}_y^{(3)}$ и $\dot{U}_{kA}^{(1.1)}$ соответственно на $\dot{U}'^{(1.1)}_k$, $\dot{U}'^{(3)}_k$ и $\dot{U}'^{(1.1)}_{yA}$.)

суммы коэффициентов $\dot{\beta}_i$. Суммы коэффициентов $\dot{\alpha}_i$ и $\dot{\beta}_i$ устанавливают связь между изменениями напряжения в фазах первого и второго повреждений.

Основные уравнения, определяющие токи и эдс в схемах последовательностей

Схему каждой последовательности при несимметричном к. з. в одной точке k можно представить в виде четырехполюсника, показанного на рис. 6б, с напряжением U_y между разомкнутыми концами

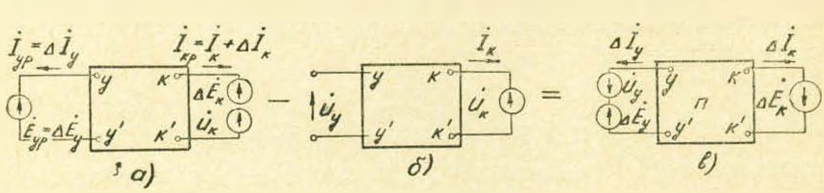


Рис. 6.

а) Окончательный режим (короткое замыкание в точках k и y);

б) Предварительный режим (короткое замыкание в точке k);

в) Изменение, вызванное вторым коротким замыканием в точке y).

$y - y'$. В результате к. з. во второй точке сети схема рис. 6б преобразуется в схему рис. 6а.

Схема рис. 6б, кроме I и U_k (указанных на рис. 6а), содержит дополнительные токи и эдс ΔE_y, $\Delta\dot{E}_k$, $\Delta\dot{I}_y$, $\Delta\dot{I}_k$.

Разность между точками и эдс, показаными на схемах рис. 6а и рис. 6б, определяет изменения, внесенные вторым к. з.

Эта разность для каждой последовательности фаз может быть представлена схемой, показанной на рис. 6в. Четырехполюсник рис. 6в, не содержит внутри себя эдс (пассивен) независимо от последовательности фаз, к которой он относится [7], в то время как четырехполюсники рис. 6а активны в схеме прямой последовательности и пассивны только в схемах обратной и нулевой последовательностей.

Поэтому изменения, вносимые вторым повреждением в схему каждой последовательности, можно определить, оперируя только пассивным четырехполюсником, показанным на рис. 6б, в котором токи и эдс связаны между собой следующими соотношениями:

$$\Delta\dot{I}_y = \dot{I}_{yp} = \frac{\dot{\alpha}\Delta\dot{E}_\kappa - \Delta\dot{E}_y + \dot{U}_y}{Z_y}, \tag{9}$$

$$\Delta\dot{I}_\kappa = \dot{I}_{\kappa p} - \dot{I}_\kappa = \frac{\dot{\beta}(\Delta\dot{E}_y - \dot{U}_y) - \Delta\dot{E}_\kappa}{Z_\kappa}, \tag{10}$$

или*

$$\Delta\dot{E}_y = \dot{E}_{yp} = \dot{U}_y - Z_y\Delta\dot{I}_y - \dot{\alpha}Z_\kappa\Delta\dot{I}_\kappa, \tag{11}$$

$$\Delta\dot{E}_\kappa = \dot{E}_{\kappa p} - \dot{U}_\kappa = -Z_\kappa\Delta\dot{I}_\kappa - \dot{\beta}Z_y\Delta\dot{I}, \tag{12}$$

где $\dot{E}_{\kappa p}$, $\dot{E}_{yp}$, $\dot{I}_{\kappa p}$, $\dot{I}_{yp}$ — составляющие эдс и токов в ветвях $k-k'$, и $y-y'$ при к. з. в двух точках сети,

$\dot{U}_y$, $\dot{U}_\kappa$, $\dot{I}_\kappa$ — то же при к. з. только в точке k.

Z_y, Z_κ — собственные сопротивления ветвей $y-y'$ и $k-k'$ в режиме к. з. (рис. 1),

Z'_y, Z'_κ — то же в режиме при разомкнутых ветвях (режим рис. 4),

$\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$ — коэффициенты, задаваемые собственными и взаимными сопротивлениями ветвей $y-y'$ и $k-k'$ и поясненные в табл. 1.

На основании приведенных выше соотношений (9)—(12) устанавливается связь между симметричными составляющими одноименной последовательности фаз в ветвях $k-k'$ и $y-y'$. Однако, из соотношений (9)—(12) можно получить всего 6 уравнений с 12 неизвестными. Эти уравнения не учитывают вида асимметрии и справедливы для любых повреждений в ветвях $k-k'$ и $y-y'$.

Шесть других уравнений, устанавливающих связь между разноименными последовательностями составляющих $\Delta\dot{I}_\kappa$, $\Delta\dot{I}_y$, $\Delta\dot{E}_k$ и $\Delta\dot{E}_y$, за-

* Уравнения (11)—(12) являются производными следующих уравнений:

$$\dot{A}\dot{I}_\kappa + Z'_y\dot{I}_y + \dot{E}_y = 0 \;(11а), \quad \dot{A}\dot{I}_y + Z'_\kappa\dot{I}_\kappa + \dot{E}_\kappa = 0. \tag{12а}$$

где $\dot{A} = \dot{\alpha}Z'_\kappa = \dot{\beta}Z'_y$, а $\dot{E}_y$, $\dot{E}_\kappa$, $\dot{I}_y$, $\dot{I}_\kappa$ эдс'ы и токи в ветвях $y-y'$ и $k-k'$ пассивного четырехполюсника.

Уравнениями (11а) и (12а) иногда удобно пользоваться взамен общеизвестных уравнений четырехполюсника.

даются видом повреждения в ветвях $k - k'$ и $y - y'$, т. е. граничными условиями для мест несимметрии. Эти граничные условия при различных к. з. в ветвях $k - k'$ и $y - y'$ приведены в табл. 2. Как видно из

Таблица 2

Вид к. з. и наименование поврежденной фазы			Граничные условия, определяющие соотношения между симметричными составляющими ΔI_i и ΔE_i в ветвях $k - k'$ и $y - y'$
Замыкание на землю	Одной фазы	A	$\Delta I_1 = \Delta I_2 = \Delta I_0$; $\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_0 = 0$
		B	$a^2\Delta I_1 = a\Delta I_2 = \Delta I_0$; $a^2\Delta E_1 + a^2\Delta E_2 + \Delta E_0 = 0$
		C	$a\Delta I_1 = a^2\Delta I_2 = \Delta I_0$; $a\Delta E_1 + a^2\Delta E_2 + \Delta E_0 = 0$
	Двух фаз	AB	$a\Delta I_1 + a^2\Delta I_2 + \Delta I_0 = 0$; $a\Delta E_1 = a^2\Delta E_2 = \Delta E_0$
		BC	$\Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_0 = 0$; $\Delta E_1 = \Delta E_2 = \Delta E_0$
		CA	$a^2\Delta I_1 + a\Delta I_2 + \Delta I_0 = 0$; $a^2\Delta E_1 = a\Delta E_2 = \Delta E_0$
	Трех фаз	ABC	— $\Delta E_1 = \Delta E_2 = \Delta E_0 = 0$

табл. 2, они аналогичны общеизвестным граничным условиям для простейших к. з. в одной точке сети. Для $\Delta\dot{I}_\kappa$ и $\Delta\dot{E}_\kappa$ они определяются только видом к. з. в ветви $k - k'$, а для $\Delta\dot{I}_y$ и ΔE, только видом к. з. в ветви $y - y'$.

Решая (9)—(12) совместно с уравнениями табл. 2 для любой последовательности фаз, можно получить уравнения, связывающие токи и эдс в ветви $k - k'$ с одноименными симметричными составляющими токов или эдс в ветви $y - y'$. Такие уравнения для составляющих нулевой последовательности фаз приведены в табл. 3. Каждая пара этих уравнений не ограничена комбинациями повреждаемых фаз (поскольку справедлива для любого наименования повреждаемых фаз в ветви $y - y'$ с фиксацией наименования поврежденных фаз только в ветви $k - k'$) и ограничена только видом повреждения.

Коэффициенты уравнения табл. 3 представляют собой комплексные величины, учитывающие взаимную связь между схемами отдельных последовательностей. Они имеют размерность сопротивлений ($\dot{n}$), проводимостей ($\dot{p}$), напряжений ($\dot{U}$) и токов ($\dot{I}$). Значения этих коэффициентов в величинах, отнесенных к составляющим отдельных последовательностей, расшифрованы в той же табл. 3.

Как видно из приведенного в табл. 3, каждый из коэффициентов содержит составляющие всех трех последовательностей. В коэффициентах $\dot{U}$, $\dot{I}$, $\dot{n}$, $\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$ эти составляющие смещаются друг относительно друга в зависимости от комбинации рассматриваемых повреждений по известным из метода симметричных составляющих правилам, а в коэффициентах $\dot{I}''$, $\dot{U}''$, $Z_{y\Sigma}$, $Z_{\kappa\Sigma}$, $Z_{y\Sigma}$, $Z'_{\kappa\Sigma}$, $Y_{y\Sigma}$, $Y_{\kappa\Sigma}$, $Y_{y\Sigma}$, $Y_{y\Sigma}$ они совпадают друг с другом по фазе.

Уравнения табл. 3 определяют нулевые составляющие токов в таблица 3

Уравнения связи между составляющими нулевой последовательности и их решение относительно $\Delta\dot I_{y0}^{(1)}$ и $\Delta\dot E_{y0}^{(1,1)}$

Вид повреждения в ветви K-K' (первое повреждение)	Вид повреждения в ветви Y-Y' (второе повреждение): Одной фазы на землю		Вид повреждения в ветви Y-Y' (второе повреждение): Двух фаз на землю		
Одной фазы A на землю	$\dot n'\Delta\dot I_{y0}+Z_{k\Sigma}\Delta\dot I_{k0}=0$ $Z_{y\Sigma}\Delta\dot I_{y0}+\dot n''\Delta\dot I_{k0}=\dot U$	$\Delta\dot I_{y0}=\frac{\dot U}{Z_{y\Sigma}+\dot\Delta^{(1)}}$ (15а)	$Y'_{y\Sigma}\Delta\dot E_{y0}+\dot\beta''\Delta\dot I_{k0}=\dot I'$ $\dot\beta'\Delta\dot E_{y0}+Z_{k\Sigma}\Delta\dot I_{k0}=\dot U''$	$\Delta\dot E_{y0}=\frac{\dot I}{Y'_{y\Sigma}+\dot\delta^{(1)}}$ (16а)	$\dot I=\dot I'+\frac{\dot\beta''}{Z_{k\Sigma}}\dot U''$ $\dot U''=\dot\beta_1\dot U_{y1}+\dot\beta_2\dot U_{y2}+\dot\beta_0\dot U_{y0}$
Двух фаз B и C на землю	$\dot\alpha'\Delta\dot I_{y0}+Y'_{k\Sigma}\Delta\dot E_{k0}=0$ $Z_{y\Sigma}\Delta\dot I_{y0}-\dot\alpha''\Delta\dot E_{k0}=\dot U$	$\Delta\dot I_{y0}=\frac{\dot U}{Z_{y\Sigma}+\dot\Delta^{(1,1)}}$ (15б)	$Y_{y\Sigma}\Delta\dot E_{y0}+\dot\rho''\Delta\dot E_{k0}=\dot I'$ $\dot\rho'\Delta\dot E_{y0}-Y_{k\Sigma}\Delta\dot E_{k0}=\dot I''$	$\Delta\dot E_{y0}=\frac{\dot I}{Y_{y\Sigma}+\dot\delta^{(1,1)}}$ (16б)	$\dot I=\dot I'-\frac{\dot\rho''}{Y_{k\Sigma}}\dot I''$ $\dot I''=\dot\rho_1\dot U_{y1}+\dot\rho_2\dot U_{y2}+\dot\rho_0\dot U_{y0}$
Трех фаз на землю	$Z_{y\Sigma}\Delta\dot I_{y0}=\dot U$ $\Delta\dot E_{k0}=0$ $\quad\dot\Delta^{(3)}=0$	$\Delta\dot I_{y0}=\frac{\dot U}{Z_{y\Sigma}}$ (15в)	$Y_{y\Sigma}\Delta\dot E_{y0}=\dot I$ $\Delta\dot E_{k0}=0$ $\quad\dot\delta^{(3)}=0$	$\Delta\dot E_{y0}=\frac{\dot I}{Y_{y\Sigma}}$ (16в)	

Наименование поврежденной фазы в ветви Y-Y' / Наименование коэффициентов	Фаза A	Фаза B	Фаза C	фаз B и C	фаз A и C	фаз B и A
Напряжение в месте второго повреждения и токи от этого напряжения всех последовательностей	$\dot U=\dot U_{yA}=\dot U_{y1}+\dot U_{y2}+\dot U_{y0}$	$\dot U=\dot U_B$	$\dot U=\dot U_C$	$\dot I'=\dot I_{y0}=\frac{\dot U_{y1}}{Z_{y1}}+\frac{\dot U_{y2}}{Z_{y2}}+\frac{\dot U_{y0}}{Z_{y0}}$	$\dot I'=\dot I_{yB}$	$\dot I'=\dot I_{yC}$
Коэффициенты составляющие несимметричную систему трех векторов, в которой коэффициент с индексом „A" принят в качестве основного вектора	$\dot n'=\dot n''=\dot n_A$ $\quad\dot\alpha'=\dot\alpha''=\dot\alpha_A$ $\dot n_A=Z_{k1}\dot\alpha_1+Z_{k2}\dot\alpha_2+Z_{k0}\dot\alpha_0$ $\dot\alpha_A=\dot\alpha_1+\dot\alpha_2+\dot\alpha_0$	$\dot n'=\dot n_C$ $\dot n''=\dot n_B$ $\dot\alpha'=\dot\alpha_C$ $\dot\alpha''=\dot\alpha_B$	$\dot n'=\dot n_B$ $\dot n''=\dot n_C$ $\dot\alpha'=\dot\alpha_B$ $\dot\alpha''=\dot\alpha_C$	$\dot\beta'=\dot\beta''=\dot\beta_A$ $\quad\dot\rho'=\dot\rho''=\dot\rho_A$ $\dot\beta_A=\dot\beta_1+\dot\beta_2+\dot\beta_0$ $\dot\rho_A=\frac{\dot\beta_1}{Z_{y1}}+\frac{\dot\beta_2}{Z_{y2}}+\frac{\dot\beta_0}{Z_{y0}}$	$\dot\beta'=\dot\beta_C$ $\dot\beta''=\dot\beta_B$ $\dot\rho'=\dot\rho_C$ $\dot\rho''=\dot\rho_B$	$\dot\beta'=\dot\beta_B$ $\dot\beta''=\dot\beta_C$ $\dot\rho'=\dot\rho_B$ $\dot\rho''=\dot\rho_C$
Величины Δ и δ для различных комбинаций сложных коротких замыканий	$\dot\Delta^{(1)}=-\frac{\dot n_A^2}{Z'_{k\Sigma}}$ $\quad\dot\Delta^{(1,1)}=\frac{\dot\alpha_A^2}{Y_{k\Sigma}}$	$\dot\Delta^{(1)}=-\frac{\dot n_A^2-3\dot n_H}{Z'_{k\Sigma}}$ $\quad\dot\Delta^{(1,1)}=\frac{\dot\alpha_A^2-3\dot\alpha_H}{Y_{k\Sigma}}$		$\dot\delta^{(1)}=\frac{\dot\beta_A^2}{Z_{k\Sigma}}$ $\quad\dot\delta^{(1,1)}=-\frac{\dot\rho_A^2}{Y_{k\Sigma}}$	$\dot\delta^{(1)}=\frac{\dot\beta_A^2-3\dot\beta_H}{Z_{k\Sigma}}$ $\quad\dot\delta^{(1,1)}=\frac{\dot\rho_A^2-3\dot\rho_H}{Y_{k\Sigma}}$	

Сопротивления и проводимости ветвей К.З. в комплексных схемах замещения	Ветвь короткого замыкания: Y-Y'		Ветвь короткого замыкания: K-K'	
Режим ветвей K-K' и Y-Y'	ветвь K-K' разомкнута	ветвь K-K' замкнута	ветвь Y-Y' разомкнута	ветвь Y-Y' замкнута
а) Сопротивление комплексной схемы по месту однофазного К.З.	$Z'_{y\Sigma}=Z'_{y1}+Z'_{y2}+Z'_{y0}$	$Z_{y\Sigma}=Z'_{y\Sigma}-Z_{k1}\dot\alpha_1^2-Z_{k2}\dot\alpha_2^2-Z_{k0}\dot\alpha_0^2$	$Z'_{k\Sigma}=Z'_{k1}+Z'_{k2}+Z'_{k0}$	$Z_{k\Sigma}=Z'_{k\Sigma}-Z_{y1}\dot\beta_1^2-Z_{y2}\dot\beta_2^2-Z_{y0}\dot\beta_0^2$
б) Проводимость комплексной схемы по месту замыкания двух фаз на землю	$Y'_{y\Sigma}=\frac{1}{Z'_{y1}}+\frac{1}{Z'_{y2}}+\frac{1}{Z'_{y0}}$	$Y_{y\Sigma}=Y'_{y\Sigma}+\frac{\dot\beta_1^2}{Z_{k1}}+\frac{\dot\beta_2^2}{Z_{k2}}+\frac{\dot\beta_0^2}{Z_{k0}}$	$Y'_{k\Sigma}=\frac{1}{Z'_{k1}}+\frac{1}{Z'_{k2}}+\frac{1}{Z'_{k0}}$	$Y_{k\Sigma}=Y'_{k\Sigma}+\frac{\dot\alpha_1^2}{Z_{y1}}+\frac{\dot\alpha_2^2}{Z_{y2}}+\frac{\dot\alpha_0^2}{Z_{y0}}$

Примечание.

1) Коэффициенты с индексами „B" и „C" определяются через симметричные составляющие коэффициентов с индексом „A", например:

$$\dot\beta_B=a^2\dot\beta_1+a\dot\beta_2+\dot\beta_0$$

$$\dot\beta_C=a\dot\beta_1+a^2\dot\beta_2+\dot\beta_0$$

Коэффициенты с индексом „H" представляют функции коэффициентов с индексами „B" и „C" и не содержат оператора „a", например:

$$\dot\beta_H=\dot\beta_1\dot\beta_2+\dot\beta_1\dot\beta_0+\dot\beta_2\dot\beta_0$$

2) Коэффициенты „$\dot U''$" и „$\dot I''$" представляют составляющие U_{yA}, перенесенные в ветвь K-K'.

3) При трехфазном К.З. ветви K-K' составляющие обратной и нулевой последовательности коэффициентов $\dot U$ и $\dot I'$ равны нулю.

месте замыкания одной фазы на землю ($\Delta\dot{I}^{(1)}_{yo}$ и $\Delta\dot{I}^{(1)}_{ko}$) и напряжения в месте замыкания двух фаз на землю ($\Delta\dot{E}^{(1.1)}_{yo}$, $\Delta\dot{E}^{(1.1)}_{ko}$).

Результат решения этих уравнений относительно $\Delta\dot{I}^{(1)}_{yo}$ и $\Delta\dot{E}^{(1.1)}_{ko}$ приведен в табл. 3. Найдя $\Delta\dot{I}^{(1)}_{yo}$ и $\Delta\dot{E}^{(1.1)}_{yo}$, можно из уравнений табл. 3 определить также значения $\Delta\dot{I}^{(1)}_{ko}$ и $\Delta\dot{E}^{(1.1)}_{ko}$.

От приведенных в табл. 3 уравнений и их решений для нулевой последовательности фаз нетрудно перейти к аналогичным уравнениям и их решению для других последовательностей фаз (пользуясь соотношениями, приведенными в табл. 2). Это позволяет определить все составляющие $\Delta\dot{I}^{(1)}$ и $\Delta\dot{E}^{(1.1)}$ в ветвях $k-k'$ и $y-y'$. Составляющие $\Delta\dot{I}^{(1.1)}$ и $\Delta\dot{E}^{(1)}$ определяются подстановкой составляющих $\Delta\dot{E}^{(1.1)}$ в уравнения (9) — (10) и $\Delta\dot{I}^{(1)}$ в уравнения (11) — (12). Таким образом, находятся все 12 составляющих, определяющих изменения, вызванные повреждением в ветви $y-y'$.

Для определения окончательных составляющих токов и эдс в ветви $k-k'$, найденные выше $\Delta\dot{I}_k$ и $\Delta\dot{E}_k$ необходимо просуммировать с соответствующими составляющими $\dot{I}_k$ и $\dot{U}_k$, известными из расчета к. з. в точке k. Зная составляющие тока в ветвях $k-k'$ и $y-y'$ нетрудно найти их распределение по ветвям сети на модели постоянного тока (распределяя их со стороны $k-k'$ при разомкнутой ветви $y-y'$, а со стороны $y-y'$ при разомкнутой ветви $k-k'$).

На основании приведенного выше очевидно, что независимо от вида повреждения в ветви $k-k'$ и независимо от комбинации поврежденных фаз составляющие $\Delta\dot{I}^{(1)}_y$ и $\Delta\dot{E}^{(1.1)}_y$ определяются двумя факторами:

1) эдс действующей в ветви $y-y'$. Эта эдс при определении составляющих $\Delta\dot{I}^{(1)}_y$ выражается в виде напряжения $\dot{U}$ и при определении составляющих $\Delta\dot{E}^{(1.1)}_y$ в виде тока $\dot{I}$.

$\dot{U}$ — представляет напряжение особенной фазы* для второго повреждения в режиме до его возникновения (при наличии повреждения только в точке k), а $\dot{I}$ — ток от указанной эдс в комплексной схеме рассматриваемого повреждения с поправкой, учитывающей взаимную связь между схемами отдельных последовательностей.

2) Независящими от эдс параметрами. Эти параметры могут быть представлены в виде сопротивлений при определении составляющих $\Delta\dot{I}^{(1.1)}_y$ и проводимостей при определении составляющих $\Delta\dot{E}^{(1.1)}_y$.

Численно они равны сопротивлению или проводимости ветви $y-y'$ в общеизвестных комплексных схемах замещения простейших к. з. с поправками Δ и δ, учитывающими влияние взаимной связи между ветвями $k-k'$ и $y-y'$ в схемах отдельных последовательностей.

При учете только индуктивных сопротивлений фазы составляю-

* Поврежденной фазы при однофазном и неповрежденной фазы при двухфазном к. з. на землю в ветви $y-y'$.

щих $\Delta\dot{I}_y^{(1)}$ и $\Delta\dot{U}_y^{(1.1)}$ в разных комбинациях сложных повреждений не зависят от $\dot{\Delta}$ и $\dot{\delta}$ и задаются только фазами коэффициентов $\dot{U}$ и $\dot{I}^*$.

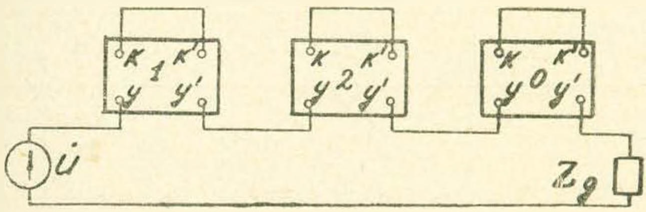


Рис. 7. Комплексная схема замещения по месту однофазного замыкания на землю в ветви $y—y'$, определяющая $\Delta\dot{I}_{yp}^{(1)}$.

Обобщая приведенное в табл. 3, можно составить комплексные схемы замещения для комбинаций однофазного замыкания на землю в ветви $y—y'$ (рис. 7) и комбинаций двухфазного замыкания на землю в ветви $y—y'$ (рис. 8).

Схема рис. 7 определяет $\Delta\dot{I}_{yo}^{(1)}$, а схема рис. 8 — $\Delta\dot{U}_{yo}^{(1.1)}$.

Схемы рис. 7 и рис. 8 сохраняются неизменными при любом виде повреждения в ветви $k—k'$. Влияние эдс в ветви $k—k'$ на ток в ветви $y—y'$ и комбинация повреждения в ветви $y—y'$ учитываются в виде сопротивления Z_g в схеме рис. 7 и проводимости Y_g в схеме рис. 8.

В табл. 4 даны значения Z_g и Y_g для различных комбинаций рассматриваемых повреждений.

В комбинациях с однофазным повреждением в ветви $k—k'$ взамен приведенных выше значений Z_g и Y_g можно принимать $Z_g=\dot{\Delta}^{(1)}$ и $Y_g=\dot{\delta}^{(1)}$, размыкая в схемах рис. 7 и рис. 8 ветвь $k—k$.

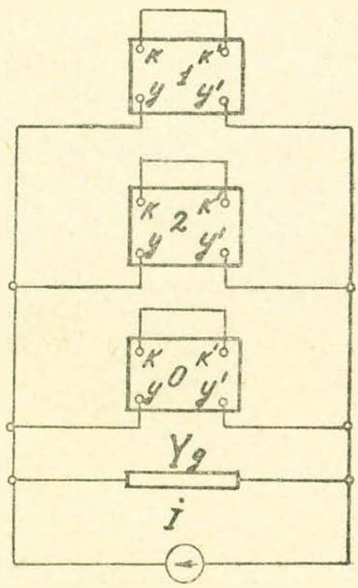


Рис. 8. Комплексная схема замещения по месту двухфазного замыкания на землю в ветви $y—y'$ определяющая $\dot{E}_{yp}^{(1.1)}$.

Комплексные схемы рис. 7 и рис. 8 могут быть представлены так же, как и комплексные схемы простейших несимметричных повреждений (при $Z_g=0$ и $Y=\infty$), однако при этом потребуется взамен напряжения $\dot{U}$ подать в схему рис. 7 напряжение $\dot{U}_э=\dot{U}\frac{Z_{y\Sigma}}{Z_{y\Sigma}+Z_g}$

---

* При учете только индуктивных сопротивлений составляющие $\dot{\Delta}$ и $\dot{\delta}$, отнесенные к схемам отдельных последовательностей, совпадают друг с другом по фазе в любых комбинациях, рассматриваемых повреждений.

Таблица 4

Вид повреждений на землю в ветви $y - y'$	Вид повреждения на землю в ветви		
	одной фазы	двух фаз	трех фаз
одной фазы	$Z_g = \dot{\Delta}^{(1)} - \dot{Z}_{y\Sigma} + Z_{y\Sigma}$	$Z_g = \dot{\Delta}^{(1.1)}$	$Z_g = 0$
двух фаз	$Y_y = \dot{\delta}^{(1)} - \dot{Y}_{y\Sigma} + Y_{y\Sigma}$	$Y_g = \dot{\delta}^{(1.1)}$	$Y_g = \infty$

Примечание: Значение величин $\dot{Z}_{y\Sigma} - Z_{y\Sigma}$; $\dot{Y}_{y\Sigma} - Y_{y\Sigma}$; $\dot{\Delta}$; $\dot{\delta}$ приведены в табл. 3.

(13), а взамен тока $\dot{I}$ в схему рис. 8 подать ток $\dot{I}_э = \dot{I}\,\dfrac{Y_{y\Sigma}}{Y_{y\Sigma} + Y_g}$ (14).

Указанная замена сохранит неизменным ток $\Delta\dot{I}_y^{(1)}$ в схеме рис. 7 и напряжение $\Delta\dot{U}_y^{(1.1)}$ в схеме рис. 8.

Схемы рис. 7 и рис. 8 определяют не только $\Delta\dot{I}_{y0}^{(1)}$ и $\Delta\dot{E}_{y0}^{(1.1)}$, но и $\Delta\dot{I}_{y1}^{(1)}$, $\Delta\dot{I}_{y2}^{(1)}$, $\Delta\dot{E}_{y1}^{(1.1)}$, $\Delta\dot{E}_{y2}^{(1.1)}$ при условии соответствующего смещения по фазе показанных на рис. 7 и рис. 8 источников тока и эдс. Эта фаза определяется комбинацией повреждения и устанавливается уравнениями, приведенными в табл. 2.

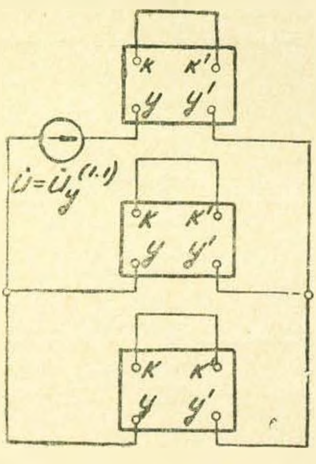


Рис. 9. Комплексная схема замещения по месту двухфазного замыкания на землю в ветви $y - y'$ и трехфазного замыкания на землю в ветви $k - k'$ определяющая $\dot{E}_{yp}^{(1.1)}$, $\dot{I}_{yp}^{(1.1)}$ и $\dot{I}_{kp}^{(3)}$.

Комплексная схема рис. 8 пригодна также для вычисления составляющих напряжений в месте разрыва одной фазы в ветви $y - y'$ при различных комбинациях к. з. в ветви $k - k'$, в чем нетрудно убедиться, сопоставляя выражения, приведенные в [9], с выражениями, приведенными в табл. 3.

При ее использовании для указанных целей под $\dot{I}$ следует подразумевать ток при к. з. в ветви $k - k'$ в разрываемой фазе в режиме до ее разрыва, а под Y, приведенные в [9] значения Δ для различных комбинаций к. з. в ветви $k - k'$.

Для любых комбинаций к. з. в ветви $y - y'$ при трехфазном к. з. в ветви $k - k'$ можно составить комплексные схемы, определяющие не только $\Delta\dot{I}_y^{(1)}$ и $\Delta\dot{E}_y^{(1.1)}$, но и все остальные составляющие в любых ветвях сети. Такая комплексная схема для двухфазного замыкания на землю в ветви $y - y'$ представлена на рис. 9, а для однофазного замыкания на землю соответствует схеме, показанной на рис. 7 при $Z_g = 0$ и $\dot{U} = \dot{U}_{y1}$.

Однако, в общем случае при несимметричных к. з. в двух точках

Таблица 5

	Наименование вычисляемых величин	Обозначение вычисляемых величин в зависимости от комбинации короткого замыкания в месте второго повреждения		Выражения, определяющие вычисляемые величины или способ их определения
		замыкание одной фазы на землю в ветви $y - y'$	замыкание двух фаз на землю в ветви $y - y'$	
1	Коэффициенты, устанавливающие связь между ветвями $y - y'$ и $k - k'$	$\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \dot{\alpha}_0$	$\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_1, \dot{\beta}_3$	См. табл. 1
2	Коэффициенты (15) — (16) табл. 3, относящиеся к рассматриваемой комбинации	$\dot{U}, \dot{n}_A, \dot{n}_н, \dot{Z}_{y\Sigma}, \dot{\Delta}^{(1)}$ (при $I_к^{(1)}$) $\dot{U}, \dot{\alpha}_A, \dot{\alpha}_н, Z_{y\Sigma}, \dot{\Delta}^{(1,1)}$ (при $I_к^{(1,1)}$) $\dot{U}, Z_{y\Sigma}$ (при $I_к^{(3)}$)	$\dot{I}, \beta_A, \beta_н, Y^1_{y\Sigma}, \delta^{(1)}$ (при $I_к^{(1)}$) $\dot{I}, P_A, P_н, Y_{y\Sigma}, \delta^{(1,1)}$ (при $I_к^{(1,1)}$) $\dot{I}, Y_{y\Sigma}$ (при $I_к^{(3)}$)	См. табл. 3
3	Составляющие токов или напряжений в месте второго повреждения	$\Delta\dot{I}_{yi} = \dot{I}_{ypi}$	$\Delta\dot{E}_{yi} = \dot{E}_{ypi}$	См. табл. 2 и уравнение (15)—(16) табл. 3
4	Изменение составляющих токов и напряжений в месте первого повреждения	$\Delta\dot{I}_{ki}, \Delta\dot{E}_{ki}$	$\Delta E_{ki}, \Delta I_{ki}$	Подстановка найденного по п. 3 табл. 5 в основные уравнения рассматриваемой комбинации, приведенные в табл. 3
5	Окончательные составляющие токи и напряжения в месте первого повреждения	I_{kpi}, E_{kpi}	E_{kpi}, I_{kpi}	Наложение найденного по п. 4 табл. 5 на режим короткого замыкания в точке K
6	Составляющие токов или напряжений в месте второго повреждения	$\Delta E_{yi} = E_{ypi}$	$\Delta I_{yi} = I_{ypi}$	Подстановка найденного по 3 и 4 табл. 5 в уравнения (9)—(12)

сети, рассмотренные комплексные схемы пригодны только для вычислений $\Delta \dot{I}_{yi}^{(1)}$ и $\Delta \dot{E}_{yi}^{(1,1)}$.

Описанный выше метод расчета выгодно отличается от других тем, что при наличии уже выполненных расчетов простейших к. з. (каковые обычно выполняются независимо от расчета сложных повреждений для всех интересующих энергосистему режимов) позволяет вычислить изменения, вносимые вторым повреждением, не изменяя схемы отдельных последовательностей.

Рекомендуемый порядок расчета приведен в табл. 5.

Пример. Имеются расчеты простейшего однофазного и трехфазного к. з. в точках k и y, результаты которых приведены в табл. 6.

Таблица 6

Место к. з.	Точка k	Точка y
Напряжение в месте к.з.	$U_{k1} = 0{,}75$, $U_{k2} = -0{,}5$ $U_{k0} = -0{,}25$	$U_{y1} = 1{,}6$, $U_{y2} = -1{,}035$ $U_{y0} = 0{,}565$
Напряжение в точке y (при к. з. в точке k) и в точке k (при к. з. в точке y)	$U_{y1} = 2{,}06$ $U_{y2} = U_{y0} = -0{,}125$ $U_y^{(3)} = 1{,}875$	$U_{k1} = 0{,}811$ $U_{k2} = U_{k0} = -0{,}377$ $U_k^{(3)} = 0{,}228$
Сопротивление, приведенное к месту к. з.	$Z'_{k1} = Z'_{k0} = 0{,}5$ $Z'_{k2} = 1$	$Z'_{y1} = 0{,}343$ $Z'_{y2} = 0{,}686$ $Z'_{y0} = 0{,}375$

Требуется определить составляющие при повреждении на землю фазы B в точке k одновременно с повреждением на землю фаз B и C в точке y.

Взамен заданных комбинаций удобнее рассматривать повреждения на землю фазы A в точке k и фаз B и A в точке y. Переход от этой комбинации к заданной не представляет затруднений, поскольку выполняется смещением находимых составляющих прямой последовательности на a^2 и обратной последовательности на a. В целях упрощения записей примера полагаем, что цепи содержат только реактивные сопротивления.

Сдвиг на 90° между составляющими токов и эдс учитывается после выполнения приведенных ниже вычислений.

Руководствуясь порядком выполнения расчета данным в табл. 5 находим:

1. Коэффициенты β_i согласно табл. 1 и табл. 6.

$$\beta_1 = \beta_2 = 0{,}364, \quad \beta_0 = 0{,}666.$$

2. Коэффициенты уравнения 16а, согласно табл. 3

$$\beta_A = 1{,}394; \; \beta_н = 0{,}617, \quad Y'_{yz} = 7{,}05; \quad \delta^{(1)} = 0{,}06$$

$$\dot{I} = 6{,}18a - 0{,}04 \;\; (\text{при } \; I' = 6{,}18a - 0{,}15 \; \text{ и } \; \frac{\beta''}{Z_k} U'' = 0{,}11).$$

3. Составляющие напряжения в месте к. з. в ветви согласно табл. 2 и уравнения 16а табл. 3.

$$aE_{yp1} = a^2E_{yp2} = E_{ypo} = \frac{6.18a - 0,04}{7,05 + 0,06} = 0,87a - 0,0057.$$

4. Изменение составляющих тока и напряжения в ветви $k - k'$ согласно основных уравнений рассматриваемой комбинации приведенных в табл. 3 и уравнения (10)

$$\Delta\dot{I}_{\kappa 1} = \Delta\dot{I}_{\kappa 2} = \Delta\dot{I}_{\kappa o} = \frac{\beta'\Delta\dot{E}_{yo} - \dot{U}''}{Z_{\kappa\Sigma}} = 0,154a - 0,366$$

$$\Delta E_{\kappa 1} = \beta(\Delta E_{y1} - U_{y1}) - \Delta I_{\kappa 1}Z_{\kappa 1} = -0,068a - 0,263$$

$$\Delta E_{\kappa 2} = -0,459a + 0,062; \quad \Delta E_{\kappa o} = 0,527a + 0,201$$

5. Составляющие тока и напряжения в ветви $k - k'$

$$I_{\kappa p1} = I_{\kappa p2} = I_{\kappa po} = 0,5 + 0,154a - 0,366 = 0,154a + 0,134$$

$$E_{\kappa p1} = -0,068a + 0,487; \quad E_{\kappa p2} = -0,459a - 0,438; \quad E_{\kappa po} = 0,527a - 0,049.$$

6. Составляющие токов в ветви $y - y'$ согласно (11)

$$\dot{I}_{yp1} = 3,64 + 0,076a^2; \quad I_{yp2} = -1,22a^2; \quad I_{ypo} = -2,42a - 0,076.$$

В дальнейшем остается только перейти от найденных значений составляющих тока к их значениям, соответствующим первоначально заданной комбинации и учесть смещение токов на 90° относительно эдс.

Этим завершается вычисление составляющих токов и напряжений в ветвях $k - k'$ и $y - y'$. При этом объем вычислений не зависит от сложности сети.

Распределение токов в ветвях сети можно получить на модели постоянного тока.

Тбилисский НИИ сооружений
и гидроэнергетики имени А. В. Винтера Поступило 12 VI 1958

Գ. Հ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐՈՒՄ ԲԱՐԴ ՈՉ ՍԻՄԵՏՐԻԿ ՎՆԱՍՎԱԾՔՆԵՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ամփոփում

Էլեկտրական սիստեմներում բարդ ոչ սիմետրիկ վնասվածքների հաշվման հայտնի եղանակները բավականին աշխատատար են և էլեկտրամոդելներում հեշտությամբ չեն յուրացվում։

Հոդվածում ցույց է տրված, որ նշված հաշվումների ծավալը կարելի է հիմնավորապես կրճատել, ելակետ ունենալով սիստեմի մեկ կետի համար պարզագույն վնասվածքի հաշվումները։ Սահմանված է քառաբևեռների

հատկությունները, որի հիման վրա լուծված են բարդ վնասվածքների ճյուղերում հոսանքի և ԷՇՈՒ (ЭДС) հաշվման հավասարումները, որպես պարզագույն կարճ միացումների հաշվումներից հայտնի հոսանքի և ԷՇՈՒ ֆունկցիա:

Առաջարկվում է բարդ վնասվածքների, ըստ երկրորդ վնասվածքի տեղի, փոխարինման կոմպլեքսային սխեմա, որը տարբերվում է պարզագույն կարճ միացումների հանրահայտնի փոխարինման կոմպլեքսային սխեմաներից՝ գետնի հետ մեկ ֆազի միացման միայն լրացուցիչ դիմադրությամբ և գետնի հետ միացման երկու ֆազերի լրացուցիչ հաղորդականությամբ:

Բարդ վնասվածքների հաշվման ամենից ավելի աշխատատար մասի դյուրացման համար սահմանված է հաստատուն հոսանքի (որն օգտագործվում է էներգոսիստեմներում պարզագույն կարճ միացումների հաշվման համար) մոդելի գործարկման հնարավորությունը:

Բերված է բարդ վնասվածքների՝ հանձնարարվող հաշվման հերթականությունը, ինչպես նաև տրված է թվական օրինակ:

Ցույց է տրված նաև, որ հաշվման ծավալը կախված չէ դիտվող ցանցի բարդությունից:

ЛИТЕРАТУРА

1. *Щедрин Н. Н.* и *Ульянов С. А.* Задачи по расчету т. к. з., ГЭИ, М., 1955.
2. *Атабеков Г. И.* Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. ГЭИ, М., 1957.
3. *Адонц Г. Т.* К теории сложных несимметричных режимов электрических систем, журн. „Электричество", № 9, 1951.
4. *Чернин А. Б.* Короткие замыкания при неполнофазных режимах электрических систем, ГЭИ, М., 1952.
5. *Адонц Г. Т.* К методу расчета сложных несимметричных режимов электрических систем, журн. „Электричество", № 8, 1949.
6. *Адонц Г. Т.* Классификация симметричных, несимметричных и сложных несимметричных соединений в трехфазных системах. Доклады АН АзССР, № 4, 1954.
7. *Атабеков Г. И.* Линейные электрические цепи, ОборонГИЗ, М., 1957.
8. Темник для рационализаторов и изобретателей Министерства электростанций СССР ГЭИ, М., 1957.
9. *Костанян Г. Г.* Расчеты к. з. в системах с неполнофазной передачей, журн. „Электричество", № 2, 1958.