

Показатель  $D_1$  определяет условия устойчивости для преобразованной схемы, в то время как показатель  $D_2$  соответствует замещению преобразуемой части ЭЭС результирующими частотными характеристиками. Из рис. 3 хорошо видно полное совпадение расчетных пределов устойчивости в обоих случаях. Для оценки относительной устойчивости преобразуемого участка системы используется показатель  $D_3$ , вычисленный в предположении введения в узле примыкания (узел 6) шин неизменного напряжения и частоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ледянкин Д.П., Ратманов С.М. Разделение сложной электроэнергетической системы на эквивалентные подсистемы для исследования статической устойчивости. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1980, № 11, с. 8—13.
2. Ледянкин Д.П., Рыжов О.И. Управляемость и наблюдаемость при эквивалентировании участка электрической системы по частотным характеристикам. — Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт, 1973, № 5, с. 93—102.

УДК 621.315.1.004.6

В.И.НОВАШ, д-р техн.наук,  
Н.Н.БОБКО (БПИ)

### ВЫБОР АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Устройства для определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима (ПАР) широко используются в сетях с глухозаземленной нейтралью при междуфазных и однофазных коротких замыканиях [1]. Однако эффективные способы ОМП при однофазных замыканиях в сетях с изолированной нейтралью в настоящее время отсутствуют. Между тем автоматизация процесса ОМП при таких повреждениях позволит значительно сократить время перерыва в электроснабжении потребителей сельскохозяйственного назначения.

В работе [2] предлагается производить ОМП при однофазных замыканиях с использованием тока и напряжения, зафиксированных в петле искусственного двойного замыкания (ИДЗ). Одной из точек такого ИДЗ является место естественного повреждения изоляции одной из фаз сети, а вторая создается искусственно путем замыкания на землю одной из неповрежденных фаз сети на шинах питающей подстанции.

Для получения формул, позволяющих производить ОПМ на отходящей от шин линии описанным способом, необходимо иметь выражения для токов и напряжений при двойных замыканиях в сети с изолированной нейтралью (рис. 1, а) в общем виде. Распределительная сеть получает питание через трансформатор Т от источни-

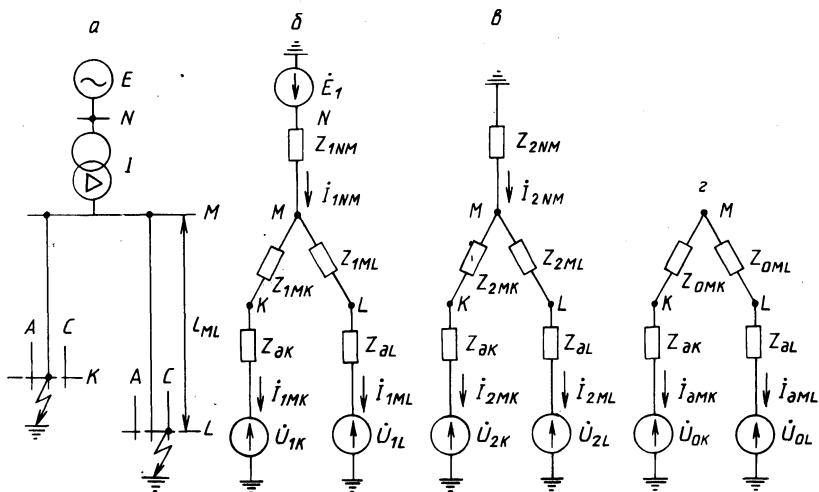


Рис. 1. Исходная схема сети (а) и схемы замещения для составляющих прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей.

ка с неизменным напряжением на шинах  $N$ . Предполагается, что двойное замыкание произошло на разных присоединениях, причем на линии  $MK$  повреждена фаза  $B$ , а на линии  $ML$  — фаза  $C$ .

Формулы для токов и напряжений при двойном замыкании могут быть получены на основе метода симметричных составляющих [3, 4]. Для этого составляют схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 1, б, в, г). В качестве особой принимают фазу  $A$ . Для трех схем замещения записывают уравнения Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{i}_{1NM} Z_{1NM} + \dot{i}_{1MK} (Z_{1MK} + Z_{\partial K}) + \dot{U}_{1K} &= \dot{E}_1, \\
 \dot{i}_{1NM} Z_{1NM} + \dot{i}_{1ML} (Z_{1ML} + Z_{\partial L}) + \dot{U}_{1L} &= \dot{E}_1, \\
 \dot{i}_{2NM} Z_{2NM} + \dot{i}_{2MK} (Z_{2MK} + Z_{\partial K}) + \dot{U}_{2K} &= 0, \\
 \dot{i}_{2NM} Z_{2NM} + \dot{i}_{2ML} (Z_{2ML} + Z_{\partial L}) + \dot{U}_{2L} &= 0, \\
 \dot{i}_{0MK} (Z_{0MK} + Z_{\partial K}) - \dot{i}_{0ML} (Z_{0ML} + Z_{\partial L}) + \dot{U}_{0K} - \dot{U}_{0L} &= 0, \\
 \dot{i}_{1MK} + \dot{i}_{1ML} &= \dot{i}_{1NM}, \\
 \dot{i}_{2MK} + \dot{i}_{2ML} &= \dot{i}_{2NM}, \\
 \dot{i}_{0MK} + \dot{i}_{0ML} &= 0.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

Систему уравнений (1) дополняют граничными условиями для фаз  $A, B, C$  в точках  $K, L$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{MKA} = 0, & \quad \dot{I}_{MKC} = 0, & \quad \dot{U}_{KB} = 0, \\ \dot{I}_{MLA} = 0, & \quad \dot{I}_{MLB} = 0, & \quad U_{LC} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Выражая в (2) все переменные через симметричные составляющие фазы А, получают совместно с (1) систему алгебраических уравнений для симметричных составляющих токов и напряжений особой фазы. Систему решают методом исключения неизвестных.

Выражения для токов на различных участках расчетной схемы приведены в табл. 1.

Выражения для симметричных составляющих напряжений фазы А в узле М, а также полных напряжений в узле М при двойном замыкании в узлах К, L имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{0MA} = A(3Z_{2NM} - Ba - Ca^2), \quad \dot{U}_{1MA} = A(3Z_{2NM} + B + C), \\ \dot{U}_{2MA} = 3AZ_{2NM}, \quad \dot{U}_{MA} = A[9Z_{2NM} + B(1-a) + C(1-a^2)], \\ \dot{U}_{MB} = AB(a^2 - a), \quad \dot{U}_{MC} = AC(a - a^2). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В табл. 1 и в (3) приняты обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A = \frac{\dot{E}_A}{3(Z_{1NM} + Z_{2NM}) + B + C}, \\ B = Z_{1MK} + Z_{2MK} + Z_{0MK} + 3Z_{\partial K}, \\ C = Z_{1ML} + Z_{2ML} + Z_{0ML} + 3Z_{\partial L}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для получения выражений токов и напряжений, соответствующих условиям ИДЗ, устремим одну из точек повреждения, например точку К, к шинам М. Тогда в (4)  $Z_{1MK}$ ,  $Z_{2MK}$ ,  $Z_{0MK}$  окажутся равны нулю. Фазное напряжение  $U_{MB}$  фазы В на шинах М также

Т а б л и ц а 1.

Симметричные составляющие токов фазы А и полные токи фаз В, С при двойном замыкании

Токи	Участок схемы по рис. 1		
	NM	MK	ML
$\dot{I}_{1A}$	3A	$A(1-a^2)$	$A(1-a)$
$\dot{I}_{2A}$	-3A	$A(a-1)$	$A(a^2-1)$
$\dot{I}_{0A}$	0	$A(a^2-a)$	$A(a-a^2)$
$\dot{I}_B$	$3A(a^2-a)$	$3A(a^2-a)$	0
$\dot{I}_C$	$3A(a-a^2)$	0	$3A(a-a^2)$

станет равным нулю. Точка К будет соответствовать месту искусственного замыкания. Точка L второго повреждения будет соответствовать естественному однофазному замыканию в сети.

Как известно [1], для одностороннего ОМП по ПАР могут быть использованы различные сочетания симметричных составляющих тока и напряжения или их линейные комбинации. Параметры, которые могут быть выбраны для ОМП по ПАР при ИДЗ, должны удовлетворять следующим требованиям: обеспечению возможности выделения ПАР имеющимися в схеме измерительными трансформаторами, независимости результатов ОМП от сопротивления предвключенных элементов энергосистемы, обеспечению максимальной точности и простоты алгоритма ОМП.

Выбор требуемого вида составляющих токов и напряжений, приведенных в табл. 1 и в выражениях (3), был сделан на основе численного расчета и сравнения этих составляющих при различных расстояниях  $l_{ML}$  до точки повреждения L. В результате проведенного анализа установлено, что наиболее полно предъявленным требованиям удовлетворяют значения тока  $\dot{I}_{МКВ}$  и напряжения  $\dot{U}_{МС}$ , действующие в петле ИДЗ.

Напряжения прямой  $\dot{U}_{1МА}$  и нулевой  $\dot{U}_{0М}$  последовательно-стей, а также полное напряжение  $\dot{U}_{МА}$  фазы А не могут быть использованы из-за зависимости их от сопротивления понижающего трансформатора. Полный ток  $\dot{I}_{МКВ}$  выбран с целью обеспечения точности измерения при больших значениях  $Z_{\partial L}$ .

Взяв отношение напряжения  $\dot{U}_{МС}$  к току  $\dot{I}_{МКВ}$ , действующих в петле ИДЗ, получим выражение

$$\sim \frac{\dot{U}_{МС}}{\dot{I}_{МКВ}} = \frac{Z_{1ML} + Z_{2ML} + Z_{0ML} + 3Z_{\partial К} + 3Z_{\partial L}}{3} \quad (5)$$

Таким образом, ток в петле ИДЗ определяется фазным напряжением поврежденной фазы, суммой сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей линии и сопротивлениями  $Z_{\partial К}$ ,  $Z_{\partial L}$  (под  $Z_{\partial К}$  в случае ИДЗ следует понимать сопротивление заземляющего контура подстанции, через которое протекает ток  $\dot{I}_{МКВ}$ ).

Известны выражения [3]

$$Z_1 = Z_2 = Z_{П-3} - Z_{М_{cp}}; \quad Z_0 = Z_{П-3} + 2Z_{М_{cp}}, \quad (6)$$

где  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_0$  — сопротивления трехфазной линии электропередачи токам прямой, обратной и нулевой последовательностей;  $Z_{П-3}$  — сопротивление петли провод—земля для однопроводной линии при возврате тока по земле;  $Z_{М_{cp}}$  — сопротивление взаимной индукции между фазами при представлении каждой фазы в виде петли провод—земля.

При подстановке (6) в правую часть (5) оказывается, что отношение напряжения к току в петле ИДЗ равно сопротивлению петли

провод—земля (при  $Z_{\partial K} = Z_{\partial L} = 0$ ), что соответствует физической сущности процессов в петле ИДЗ и подтверждает правильность полученного выражения (5).

Предполагая, что удельные сопротивления линии  $Z_{1уд}$ ,  $Z_{2уд}$ ,  $Z_{0уд}$  равномерно распределены по длине  $l_{ML}$  участка  $ML$ , и записав выражение (5) для реактивных удельных сопротивлений  $X_{1уд}$ ,  $X_{2уд}$ ,  $X_{0уд}$ , получим формулу для ОМП по ПАР при ИДЗ:

$$I_{ML} = \frac{3U_{MC} \sin \varphi}{I_{MB} (X_{1уд} + X_{2уд} + X_{0уд})}, \quad (7)$$

где  $\varphi$  — угол между током и напряжением в петле ИДЗ. Сумму  $X_{1уд} + X_{2уд} + X_{0уд}$  можно назвать расчетным удельным сопротивлением линии при ОМП по ПАР при ИДЗ. Расчет расстояния по индуктивным сопротивлениям линии позволяет исключить влияние активных сопротивлений линий, а также сопротивлений  $Z_{\partial K}$ ,  $Z_{\partial L}$ , которые можно считать активными, на результат ОМП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ш а л ы т Г.М. Определение мест повреждений в электрических сетях. — М.: Энергоиздат, 1982. — 312 с. 2. П е к л е р В.Н. Определение места однофазного замыкания в воздушных сетях с изолированной нейтралью. — Промышл. энергетика, 1973, № 5, с.24—27. 3. Ч е р н и н А.Б., Л о с е в С.Б. Основы вычислений электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах. — М.: Энергия, 1971. — 440 с. 4. У л ь я н о в С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.—Л.: Энергия, 1964. — 704 с.

УДК 621.311.22(088.8)

В.А.ЧИЖ, В.К.БАЛАБАНОВИЧ, канд.техн.наук,  
Н.И.ШКОДА, канд.техн.наук (БПИ)

### К ВЫБОРУ СПОСОБА ГЛУБОКОЙ РАЗГРУЗКИ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ТУРБИН

Возрастающая доля АЭС приводит к необходимости полной или частичной разгрузки всего генерирующего оборудования ТЭС на органическом топливе. Поэтому актуальной становится задача превращения энергоблоков, включая энергоблоки ТЭЦ, в полупиковые. Сложная проблема маневренности паровых турбин — это не только повреждаемость деталей вследствие малоциклового усталости, но и ухудшение вибрационной надежности облопачивания, надежности работы последних лопаток и др. [ 1 ].

Для достаточно эффективного с технической и экономической точек зрения прохождения провалов электрических нагрузок на ТЭС разработан ряд технических решений [ 2—4 ]. Применительно