

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ УЧАСТКА ЛИНИИ С ОТПАЙКОЙ И ВЕЛИЧИНЫ ПРОВОДИМОСТИ ИЗОЛЯЦИИ В МЕСТЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## RESEARCH OF POSSIBILITIES TO LOCATE THE POINT OF FAULT IN SECTION OF LINE WITH TAP AND DEFINE THE MAGNITUDE OF SHUNT CONDUCTANCE IN THE POINT OF FAULT

S.N. Husainov, R.R. Naraeva  
Chelyabinsk, SUSU

Исследуется влияние величины проводимости изоляции в месте повреждения для разных участков сети на точность определения проводимости изоляции, а также возможность определения места повреждения участка линии с отпайкой.

*Ключевые слова:* цифровая модель, гипотезы повреждения, суммарная проводимость изоляции, активная проводимость, коэффициент распределения проводимости, режимные параметры сети.

The present work researches the influence of the magnitude of shunt conductance in the point of fault for different sections of the network upon the accuracy of determination of the shunt conductance. The possibility to locate the point of fault in section of line with tap was researched as well.

*Keywords:* numerical model, hypothesis testing, aggregated shunt conductance, active conductivity, coefficient of the conductivity distribution, nominal parameters of the grid.

Продолжены исследования, начатые в работах [1, 2, 3], по определению величины проводимости изоляции линии с отпайкой в случае повреждения на одном из участков сети и погрешности расчета проводимости изоляции, а также по определению участка повреждения.

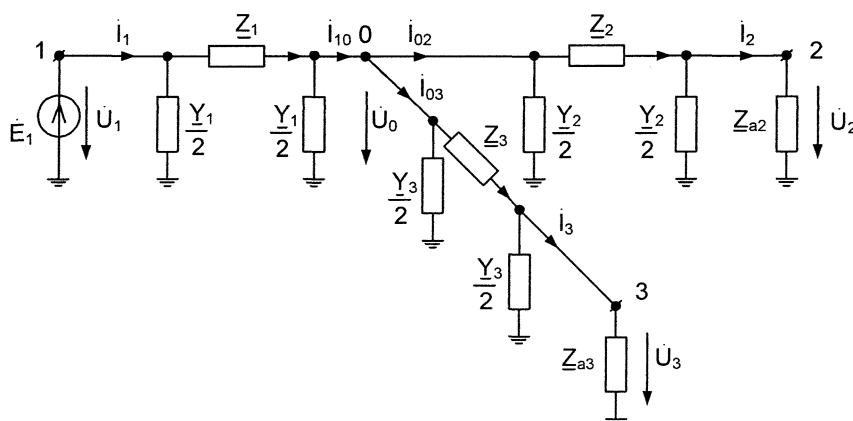
Рассматривается трехфазная цепь с симметричным источником ЭДС и симметричной нагрузкой, в которой произошло повреждение изоляции в фазе А, поэтому расчеты проводимостей изоля-

ции выполняются для схемы фазы А и сопоставляются с проводимостями изоляции неповрежденной фазы В. Как и работах [1, 2], расчеты выполняются для П-образной схемы замещения линии с отпайкой по методу узловых потенциалов.

Схема замещения фазы участка сети представлена на рисунке.

Расчеты проводятся поочередно для каждого участка сети для трех случаев ухудшения изоляции:

1) на первом участке (1-0) главной линии;



П-образная схема замещения фазы участка сети

- 2) на втором участке (0-2) главной линии;
- 3) на третьем участке (0-3) отпаечной линии.

В работе использованы результаты исследований влияния величины проводимости изоляции в месте повреждения на точность определения проводимости изоляции с использованием данных цифровых моделей (симметричной и с ухудшением изоляции) в фазе А на первом, втором и третьем участках сети соответственно с величиной ухудшения проводимости изоляции:

$$\underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{b1} + 10 \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}), \quad \underline{Y}_{a2} = \underline{Y}_{b2} + 10 \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}), \\ \underline{Y}_{a3} = \underline{Y}_{b3} + 10 \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}).$$

Здесь  $\underline{Y}_{a1}$  - проводимость изоляции в фазе А на первом участке;  $\underline{Y}_{a2}$  - проводимость изоляции в фазе А на втором участке;  $\underline{Y}_{a3}$  - проводимость изоляции в фазе А на третьем участке;  $\underline{Y}_{b1}$  - проводимость изоляции в фазе В на первом участке;  $\underline{Y}_{b2}$  - проводимость изоляции в фазе В на втором участке;  $\underline{Y}_{b3}$  - проводимость изоляции в фазе В на третьем участке;  $\underline{Y}_{sb}$  - суммарная проводимость изоляции в фазе В ( $\underline{Y}_{sb} = \underline{Y}_{b1} + \underline{Y}_{b2} + \underline{Y}_{b3}$ ).

Действительные значения измеряемых величин, полученные в цифровых моделях, используются при моделировании измерений напряжений и токов приборами класса 0,1 для 100 циклов измерений. Расчеты выполняются по методу узловых потенциалов для П-образной схемы замещения (см. рисунок) по трем вариантам уравнений цепи.

Вариант 1 - расчет по методу узловых потенциалов без дополнительных уравнений:

$$\left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( g + \frac{Y + \underline{Y}_3}{2} \right) - U_1 \frac{1}{\underline{Z}_1} - U_2 e^{j\operatorname{Re}(\psi)} \frac{1}{\underline{Z}_2} - U_3 e^{j\operatorname{Im}(\psi)} \frac{1}{\underline{Z}_3} \right] = 0; \\ \left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( \frac{-1}{\underline{Z}_2} \right) + U_2 \left( \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{(1-m)\underline{Y}}{2} \right) + \dot{I}'_2 \right] e^{j\operatorname{Re}(\psi)} = 0; \\ \left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( \frac{-1}{\underline{Z}_3} \right) + U_3 \left( \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{\underline{Y}_3}{2} \right) + \dot{I}'_3 \right] e^{j\operatorname{Im}(\psi)} = 0.$$

Здесь  $\dot{U}_1 = U_1$ ;  $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\operatorname{Re}(\psi)}$ ;  $\dot{U}_3 = U_3 e^{j\operatorname{Im}(\psi)}$ ;;

$$\dot{I}_1 = I_1 e^{-j\varphi_1}; \quad \dot{I}_2 = I_2 e^{-j\varphi_2}; \quad \dot{I}_3 = I_3 e^{-j\varphi_3};$$

$$\psi = \psi_2 + j\psi_3; \quad \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} = g,$$

где  $\psi_2$  - начальная фаза напряжения  $\dot{U}_2$  в конце второго участка;  $\psi_3$  - начальная фаза напряжения  $\dot{U}_3$  в конце отпаечной линии;  $\underline{Y}$  - проводимость

основной (главной) линии;  $\underline{Y}_3$  - проводимость отпаечной линии;  $m$  - коэффициент распределения проводимости или доля проводимости первого участка в основной линии;  $\underline{Z}_1$  - сопротивление первого участка линии;  $\underline{Z}_2$  - сопротивление второго участка линии;  $\underline{Z}_3$  - сопротивление отпаечной линии.

Вариант 2 - к уравнениям варианта 1 добавляются дополнительные уравнения для токов  $\dot{I}'_{10}$ ,  $\dot{I}'_{02}$ ,  $\dot{I}'_{03}$  в месте присоединения отпайки, записанные по законам Кирхгофа и Ома для трех участков линии:

$$\left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( g + \frac{Y + \underline{Y}_3}{2} \right) - U_1 \frac{1}{\underline{Z}_1} - U_2 e^{j\operatorname{Re}(\psi)} \frac{1}{\underline{Z}_2} - U_3 e^{j\operatorname{Im}(\psi)} \frac{1}{\underline{Z}_3} \right] = 0; \\ \left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( \frac{-1}{\underline{Z}_2} \right) + U_2 \left( \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{(1-m)\underline{Y}}{2} \right) + \dot{I}'_2 \right] e^{j\operatorname{Re}(\psi)} = 0; \\ \left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( \frac{-1}{\underline{Z}_3} \right) + U_3 \left( \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{\underline{Y}_3}{2} \right) + \dot{I}'_3 \right] e^{j\operatorname{Im}(\psi)} = 0; \\ \dot{I}_1 - \frac{mY}{2} \left[ U_1 \left( 2 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] - \dot{I}'_{10} = 0; \\ \dot{I}_2 - \frac{(1-m)\underline{Y}}{2} \left[ U_2 \left( 2 + \frac{(1-m)\underline{Y}\underline{Z}_2}{2} \right) + \dot{I}'_2 \underline{Z}_2 \right] - \dot{I}'_{02} = 0; \\ \dot{I}_3 - \frac{\underline{Y}_3}{2} \left[ U_3 \left( 2 + \frac{\underline{Y}_3 \underline{Z}_3}{2} \right) + \dot{I}'_3 \underline{Z}_3 \right] - \dot{I}'_{03} = 0.$$

Вариант 3 - к уравнениям варианта 1 по методу узловых потенциалов добавляются дополнительные уравнения для напряжения  $\dot{U}_0$  в месте присоединения отпайки, записанные по законам Кирхгофа и Ома для трех участков линии:

$$\left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( g + \frac{Y + \underline{Y}_3}{2} \right) - U_1 \frac{1}{\underline{Z}_1} - U_2 e^{j\operatorname{Re}(\psi)} \frac{1}{\underline{Z}_2} - U_3 e^{j\operatorname{Im}(\psi)} \frac{1}{\underline{Z}_3} \right] = 0; \\ \left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( \frac{-1}{\underline{Z}_2} \right) + U_2 \left( \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{(1-m)\underline{Y}}{2} \right) + \dot{I}'_2 \right] e^{j\operatorname{Re}(\psi)} = 0; \\ \left[ U_1 \left( 1 + \frac{mY\underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \left[ \left( \frac{-1}{\underline{Z}_3} \right) + U_3 \left( \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{\underline{Y}_3}{2} \right) + \dot{I}'_3 \right] e^{j\operatorname{Im}(\psi)} = 0.$$

$$+ \left[ U_3 \left( \frac{1}{Z_3} + \frac{Y_3}{2} \right) + i'_3 \right] e^{j\text{Im}(\psi)} = 0;$$

$$\left| U_1 \left( 1 + \frac{mY_1 Z_1}{2} \right) - i'_1 Z_1 \right| - U_0 = 0;$$

$$\left| U_2 \left( 1 + \frac{(1-m)Y_2 Z_2}{2} \right) + i'_2 Z_2 \right| - U_0 = 0;$$

$$\left| U_3 \left( 1 + \frac{Y_3 Z_3}{2} \right) + i'_3 Z_3 \right| - U_0 = 0.$$

Все три варианта уравнений с данными цифровых моделей (симметричной и с ухудшением изоляции на первом, втором и третьем участках сети) решаются методом минимизации среднеквадратичной погрешности в канале MathCAD.

Затем выполняется перерасчет коэффициента распределения проводимости  $m$ , так как в случае ухудшения изоляции данный коэффициент не соответствует распределению проводимости по участкам сети.

Как показано в [1], характер распределения проводимости изоляции по участкам сети при отсутствии повреждений практически не влияет на определение суммарной проводимости изоляции, поэтому можно считать, что проводимость распределяется пропорционально длине участков.

При наличии повреждения, особенно при большой величине проводимости в месте повреждения, расчет в предположении равномерности распределения проводимости изоляции дает неверный результат. С другой стороны, по данным измерений режимных параметров мы не можем судить о том, где расположено повреждение. В связи с этим проводим расчет с выдвижением гипотез о месте повреждения. Рассматриваем три гипотезы: гипотеза 1 - повреждение на первом участке; гипотеза 2 - повреждение на втором участке; гипотеза 3 - повреждение на третьем участке, по которому и выполняем перерасчет коэффициента распределения проводимости  $m$  по участкам сети.

Увеличение активной проводимости на один порядок и сохранение малой величины реактивной проводимости (см. выше) в случае ухудшения изоляции позволяют в допустимых пределах рассчитать погрешности определения активных проводимостей, а для реактивных проводимостей дают большой процент погрешности. Кроме того, повреждение изоляции добавляет активные токи утечки, и поэтому с учетом изложенного выше анализу подлежат только активные проводимости.

Результаты расчета погрешности определения проводимости изоляции при повреждении на первом участке приведены в табл. 1. Поскольку проводимость 3-го участка мала по сравнению с проводимостью поврежденного участка (табл. 2), то погрешности ее определения превышают саму проводимость. Поэтому эти значения для вариантов 1 (без дополнительных уравнений) и 3 (с дополнительными уравнениями по напряжению) в табл. 1 не приведены.

Приведенные результаты показывают, что для правильных гипотез (см. выше) погрешности определения суммарной проводимости изоляции и проводимости изоляции поврежденного участка находятся в допустимых пределах и являются меньшими, чем для ошибочных гипотез. То есть достаточно точно можно определить проводимость поврежденного участка и суммарную проводимость изоляции сети.

Кроме того, подтверждением правильности гипотез по предполагаемым участкам повреждения являются величины суммарной проводимости изоляции и проводимости изоляции поврежденного участка. Критерием правильной гипотезы считается:

- положительная величина проводимости изоляции;

Таблица 1

Погрешности определения проводимости изоляции при повреждении на первом участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
Gmax, %	26,5	1847	-180
Gmin, %	-61,9	8,95	-289
Gsmax, %	4,68	13,9	7,77
Gsmin, %	-2,03	-1310	4,34
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax, %	4,77	-95,6	-97,4
Gmin, %	-3,82	-96,1	-137
G3max, %	138	-82,6	945
G3min, %	-154	-84,4	-10,8
Gsmax, %	2,55	-95,2	-94,4
Gsmin, %	-2,99	-95,7	-114
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
Gmax, %	19,0	318	-15,4
Gmin, %	-49,2	198	-631
Gsmax, %	7,79	108	41,5
Gsmin, %	-13,1	46,0	-235

Проводимости изоляции для случая повреждения на первом участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
Gmax	0,004859056	0,0747694704	-0,0030812604
Gmin	0,001461284	0,0041836666	-0,0072425392
G3max	0,0026842204	0,0000403735	0,0113743338
G3min	-0,0009795854	-0,1225406288	0,0073489507
Gsmax	0,0041455044	0,004510612	0,0042676903
Gsmin	0,0038794706	-0,0479096911	0,0041317946
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax	0,0040232722	0,0001687614	0,0001007959
Gmin	0,0036932454	0,0001515308	-0,0014109121
G3max	0,0002861972	0,0000208262	0,0012545261
G3min	-0,0000646915	0,00001867	0,000107045
Gsmax	0,0040609996	0,0001887098	0,0002212639
Gsmin	0,0038414305	0,0001710893	-0,000554867
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
Gmax	0,0045705545	0,016039022	0,0032492156
Gmin	0,0019502798	0,0114573486	-0,020405956
G3max	0,0019365197	-0,0049995483	0,0158257856
G3min	-0,0007284265	-0,0079230047	0,0000980228
Gsmax	0,0042684794	0,0082258381	0,0056044664
Gsmin	0,0034423664	0,0057807775	-0,0053535956

- увеличение суммарной проводимости и проводимости поврежденного участка на один и тот же порядок (см. табл. 2).

Действительно, при повреждении на первом участке (см. табл. 1) по всем трем вариантам уравнений цепи проходит гипотеза 1, по которой предполагается повреждение на участке (1-0) с более точными результатами по 2-му варианту (с дополнительными уравнениями по току).

Аналогично при повреждении на втором участке правильной является гипотеза 2, с предполагаемым ухудшением изоляции на участке (0-2) и с лучшими результатами по 3-му варианту.

Таким образом, результаты данных исследований позволяют для линии с отпайкой определить участок повреждения сети и величину суммарной проводимости изоляции и проводимости изоляции поврежденного участка.

**Литература**

1. Хусаинов, Ш.Н. Анализ методов определения проводимости изоляции для линии с отпайкой / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2007. - Вып. 8. — № 20(92). - С. 32-37.

2. Нараева, Р.Р. Анализ погрешности результатов расчета параметров изоляции, в зависимости от выбранных схем замещения линии электропередачи / Р.Р. Нараева, Ш.Н. Хусаинов // Наука и технологии: сб. науч. тр. - М.: РАН, 2007. - С. 364-374.

3. Хусаинов, Ш.Н. Определение параметров изоляции для линии с отпайкой по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.И. Сидоров, НА. Хусаинова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2001. - Вып. 1. - № 4(04). - С. 55-59.

Поступила в редакцию 08.09.2008 г.

Хусаинов Шамиль Нагимович. Доктор технических наук, профессор. В настоящее время работает в Южно-Уральском государственном университете на кафедре «Системы электроснабжения». Контактный телефон: 8-(351) 267-91-51

Husaiunov Shamil Nagimovich. Doctor of technical science, Professor. At the present moment he works at the South Ural State University, Power Distribution Systems department. Contact phone: 8-(351) 267-91-51

Нараева Рузалия Раисовна окончила энергетический факультет Челябинского политехнического института (ЧПИ) в 1983 году. В настоящее время работает в Южно-Уральском государственном университете в должности старшего преподавателя кафедры «Электротехника». Контактный телефон: 8-(351) 267-90-14

Naraeva Ruzalia Raisovna graduated the Power Engineering Faculty of the Chelyabinsk Polytechnic Institute (now South Ural State University) in 1983. At the present moment she works as a senior instructor at the Power Distribution Systems department, South Ural State University. Contact phone: 8-(351) 267-90-14.