

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ С УЧЁТОМ ВЗАИМОИНДУКЦИИ

Зубов Е. А., Ефимов А. В.

научный руководитель – к.т.н., доцент Ершов Ю. А.

*Сибирский федеральный университет*

Взаимоиндукция – возникновение электродвижущей силы в одном проводнике вследствие изменения силы тока в другом проводнике или вследствие изменения взаимного расположения проводников.

Наличие параллельной цепи изменяет значение сопротивления рассматриваемой линии вследствие появления взаимоиндукции, действующей в сторону уменьшения магнитного потока. При замыкании на землю изменение сопротивления имеет существенное значение для системы токов нулевой последовательности.

При сближении трасс линий электропередач они начинают взаимодействовать по неуравновешенной нулевой последовательности. Электростатическое взаимодействие, как правило, незначительно и в практических расчетах обычно не учитывается. Индуктивное взаимодействие при удалении трасс линий в пределах до километра представляет собой значительные величины, должно учитываться и является причиной разбегания линий на участки взаимодействующих двух, трех и т.д. линий. Сближение и удаление трасс линий приводит также к появлению участков одиночных, не взаимодействующих с другими, линий [1].

Участки взаимодействующих линий моделируются ветвями с взаимоиндукцией или ветвями с поперечной проводимостью в пределах каждой цепи и взаимоиндукцией между разными цепями. Ветви с взаимоиндукцией по нулевой последовательности разных цепей в пределах прямой (обратной) последовательности заменяются простыми ветвями или ветвями с поперечной проводимостью.

Основное влияние взаимоиндуктивные связи оказывают на зону действия токовых защит нулевой последовательности и дистанционных защит.

Формулы для расчета удельных параметров нулевой последовательности для одиночной линии и совокупностей взаимодействующих линий представлены ниже [2]:

Полное сопротивление, а также активная и индуктивная (взаимоиндуктивная) составляющие продольного взаимодействия  $i$ -й линии с фазами  $A_i, B_i, C_i$  и  $j$ -й линией с фазами  $A_j, B_j, C_j$  по нулевой последовательности в расчете на одну фазу определяется формулой

$$z_{i-j} = r_{i-j} + j x_{i-j} = 0,15 + j 0,435 \lg(D_3 / D_{\text{ср}i-j}) \text{ (Ом/км)},$$

где  $D_3 \cong 939$  – эквивалентная глубина (м) протекания обратного тока в земле;

$D_{\text{ср}i-j} \cong d_{\text{ср}i-j}$  – среднегеометрическое расстояние между фазами  $i$ -й и  $j$ -й цепей, которое приближенно может быть принято как среднее по горизонтали расстояние между фазами  $i$ -й и  $j$ -й цепей.

Емкость поперечного взаимодействия  $i$ -й линии с фазами  $A_i, B_i, C_i$  и  $j$ -й линией с фазами  $A_j, B_j, C_j$  по нулевой последовательности в расчете на одну фазу находится по выражению:

$$C_{i-j} = \frac{0,803 \cdot 10^{-8}}{\lg(S_{\text{ср}i-j} / D_{\text{ср}i-j})} = \frac{0,02401 \cdot 10^{-6}}{\lg[(S_{\text{ср}i-j} / D_{\text{ср}i-j})^3]} \text{ (Ф/км)},$$

где  $S_{срi-j}$  – среднегеометрическое расстояние между фазами  $A_i, B_i, C_i$   $i$ -й взаимодействующей линии и зеркальными отображениями  $A'_j, B'_j, C'_j$  фаз  $A_j, B_j, C_j$   $j$ -й взаимодействующей линии.

Для практических целей вполне достаточным является использование приближенных соотношений между параметрами прямой и нулевой последовательностей: при не учете или изолированных тросах  $C_0 \cong (0,55-0,6)C_1, b_0 = (0,55-0,6)b_1$ , при наличии тросов  $C_0 \cong (0,65-0,7)C_1, b_0 = (0,65-0,7)b_1$ .

Влияние взаимоиנדукции линий рассмотрено на примере схемы рис. 1.

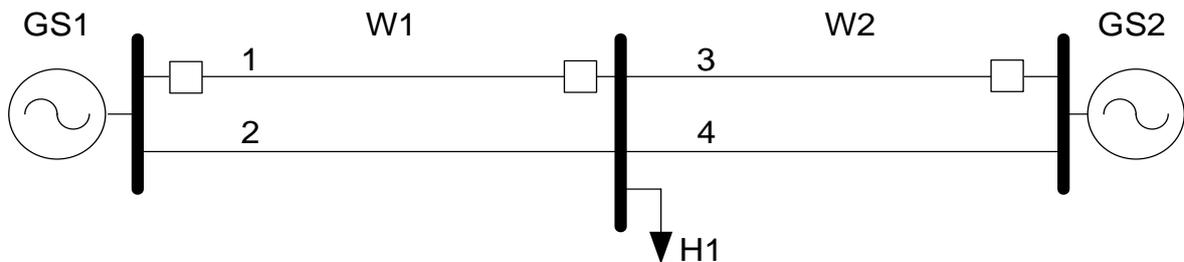


Рис. 1 – Схема исследуемой сети

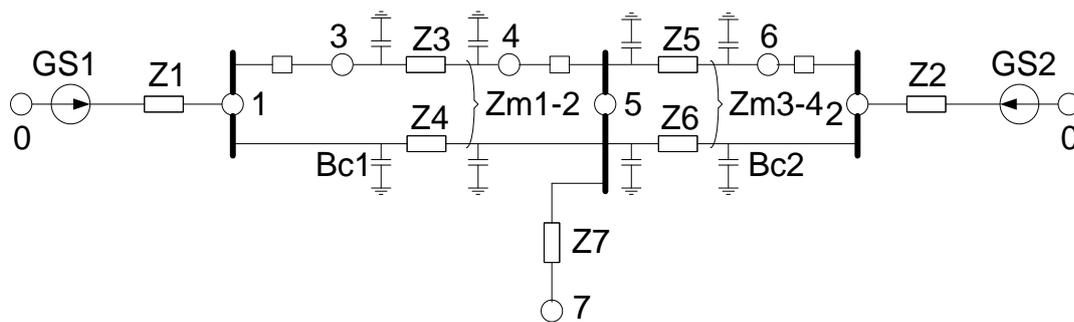


Рис. 2 – Схема замещения исследуемой сети

Активное, реактивное сопротивление и емкостная проводимость взаимодействия по нулевой последовательности между параллельными линиями:

$$\begin{aligned}
 r_{1-2} &= r_{1-2y} \cdot l = 0,15 \cdot 60 = 10,5 \text{ Ом}; \\
 x_{1-2} &= x_{1-2y} \cdot l = 0,87 \cdot 60 = 60,9 \text{ Ом}; \\
 r_{3-4} &= r_{3-4y} \cdot l = 0,15 \cdot 70 = 9 \text{ Ом}; \\
 x_{3-4} &= x_{3-4y} \cdot l = 0,87 \cdot 70 = 52,2 \text{ Ом}; \\
 b_{1-2} &= 0,65 \cdot b_1 = 0,65 \cdot 182 \cdot 10^{-6} = 118,3 \cdot 10^{-6} \text{ См}; \\
 b_{3-4} &= 0,65 \cdot b_1 = 0,65 \cdot 156 \cdot 10^{-6} = 101,4 \cdot 10^{-6} \text{ См}.
 \end{aligned}$$

Расчёты однофазных токов короткого замыкания в различных точках произведены в программном комплексе *TKZ-3000* и представлены в таблице 1.

*TKZ-3000* – это программно-вычислительный комплекс предназначенный для расчёта нормальных и аварийных режимов работы электроэнергетической системы.

Таблица 1  
 Результаты расчёта на ЭВМ, размеры в амперах

Точка КЗ	без учёта взаимоиндуктивности				с учетом взаимоиндуктивности			
	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>0</sub>	I <sup>(1)</sup>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>0</sub>	I <sup>(1)</sup>
1	301	274	207	782	297	270	158	725
5	473	500	481	1454	392	419	390	1201
2	322	348	271	941	306	333	204	843
7	125	152	146	423	116	143	133	392
3*	151	193	180	524	199	240	357	796
4*	81	52	39	172	85	57	159	301
5**	552	583	538	1673	507	538	558	1603
* – При каскадном отключении параллельной линии.								
** – При отключении параллельной линии и заземлении её по концам.								

Из таблицы видно, что при внешних однофазных КЗ не учет взаимоиндукции приводит к погрешности более 10% и уменьшению зоны действия токовых защит от однофазных КЗ.

При каскадном отключении одной из параллельных линий погрешность тока КЗ может достигнуть 30-40% и увеличивается зоны действия токовых защит от однофазных КЗ.

При отключении параллельной линии не учет взаимоиндукции приводит к погрешности более 5% и уменьшению зоны действия токовых защит от однофазных КЗ.

Влияние взаимоиндукции на зону действия дистанционных защит[3]:

При отключенной и заземленной на обоих концах одной из цепей параллельных ВЛ, область действия дистанционных органов в оставшейся в работе цепи увеличивается. В данном случае эквивалентное полное сопротивление нулевой последовательности оставшейся в работе ВЛ, равно:

$$\bar{Z}_{0\Omega} = \frac{\bar{Z}_0^2 - \bar{Z}_{m0}^2}{\bar{Z}_0},$$

где  $\bar{Z}_0$  – сопротивление нулевой последовательности;

$\bar{Z}_{m0}$  – сопротивление взаимоиндукции.

Указанное влияет на значение общего полного сопротивления контура измерения и приводит к расширению области действия дистанционных органов при КЗ на землю.

При отключенной и незаземленной параллельной цепи взаимное сопротивление линии нулевой последовательности не влияет на измерение, выполняемое дистанционными органами от КЗ на землю в поврежденной цепи. Это значит, что охват дистанционных органов будет уменьшен, если по условиям расчетного режима эквивалентное полное сопротивление нулевой последовательности (являющееся определяющим для расчета коэффициентов компенсации) было задано на работу с отключенной и заземленной на обоих концах параллельной цепью.

В случае, когда параллельная цепь в работе, взаимоиндукция нулевой последовательности может значительно сократить зону действия дистанционных органов защищаемой цепи. Такое сокращение зоны действия обычно не бывает больше чем

на 15%. Однако, когда зона действия сокращается на одном конце ВЛ, она пропорционально увеличивается на противоположном конце линии. Поэтому это сокращение не должно, на линиях с телеускорением дистанционной защиты, привести к его срыву из-за наличия участков, где зоны действия I ступеней не перекрываются.

Учет влияния взаимоиндукции на замеры дистанционных органов при однофазных КЗ, как правило, обычно достаточно производить для первой и второй ступеней дистанционной защиты. Уставки резервных ступеней (ступень 3 и выше) обычно настолько высокие, что в учете такого влияния, в большинстве случаев, нет необходимости [3].

Таким образом, можно рекомендовать учитывать в инженерных расчетах взаимоиндуктивные связи при расстоянии между трассами линий до 1 км. А в программах, в которых не предусмотрен учет взаимоиндуктивных связей вводить коэффициенты компенсации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1 Барзам А. Б. Общие вопросы учебного проектирования релейной защиты и автоматики: – М: “Энергия”, 1969. – 312 с.

2 Расчеты токов КЗ для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. Рук. указания по релейной защите, вып. 11/ВГПИ НИИ ЭСП. –М.: Энергия, 1979. –152 с.

3 Рекомендации по выбору уставок дистанционных защит от всех видов КЗ и токовых защит устройства 7SA 522 /7SA6, Siemens, 2003. – 166 с.