

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНЫХ
ЗАЩИТ ЛЭП В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СОБСТВЕННЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Николаев Н.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Барина Е.К., Губина О.А.
Научный руководитель – доцент Игуменцев В.А.**

*Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова*

Промышленные предприятия многих энергоемких отраслей промышленности располагают значительным объемом вторичных энергоресурсов. К наиболее характерным случаям можно отнести предприятия черной металлургии, вторичными энергоресурсами которых являются доменный, коксовый, конвертерный газы, каменноугольная смола, вторичный пар и др. Это стимулирует интенсивное развитие собственных источников электроэнергии, позволяющих обеспечить надежное электроснабжение потребителей первой категории и особой группы, снизить зависимость предприятия от энергоснабжающей организации, уменьшить долю затрат на электроэнергию в себестоимости готовой продукции.

В таких условиях актуальной является задача обеспечения надежной работы собственных электростанций предприятия, одной из составляющих которой является снижение количества ложных и избыточных срабатываний релейной защиты распределительных сетей. Такие ошибки приводят к выходу электростанций на отдельную от энергосистемы работу с существенным небалансом по активной мощности, что приводит к их аварийному погасанию. Это сопровождается значительным экономическим ущербом, обусловленным недовыработкой собственной дешевой электроэнергии в течение времени простоя, а также дополнительными расходами на пуск котлов и турбоагрегатов.

Для предотвращения названных последствий в сложносвязанных сетях напряжением 110-220 кВ, характерных для предприятий с несколькими собственными электростанциями, необходимо оценивать правильность выбранных параметров срабатывания путем расчета переходного режима при коротком замыкании с одновременным контролем условий срабатывания защит на каждом интервале времени. Такой расчет позволит оценить быстрдействие, чувствительность и селективность каждого из видов защит и может выполняться только при наличии соответствующего программного обеспечения.

Одними из наиболее распространенных и в то же время наиболее сложных для моделирования защит в сетях 110-220 кВ являются дифференциально-фазные защиты линий (ДФЗ). В разработанном программном обеспечении действие данной защиты моделируется непосредственно в ходе расчета переходного процесса. При этом на каждом шаге расчета контролируются мгновенные значения токов во всех точках сети, в частности, по концам защищаемой линии. Алгоритм расчета основан на сочетании модифицированного метода последовательного эквивалентирования и метода последовательных интервалов. Если мгновенные значения токов совпадают по знаку, то защита работает и отключает поврежденный участок. Если мгновенные значения токов различаются по знаку, то защита не работает.

Достоинством разработанного программного обеспечения является то, что оно позволяет выявить возможность ложного срабатывания ДФЗ. Ложное срабатывание возможно в силу того, что в начальные моменты переходного процесса на кривую полного тока значительное влияние оказывает аperiodическая составляющая и генераторы высокочастотных полуккомплектов запускаются на время, в общем случае отличное от времени, соответствующего полупериоду.

Условия срабатывания для наиболее распространенных ДФЗ сформулированы следующим образом.

Микропроцессорный комплект ШЭ 2607 081 «ЭКРА».

Условие срабатывания отключающего органа фазного тока при трехфазном коротком замыкании:

$$I_{(n)} > I_{откл}.$$

Условие работы отключающего органа по току обратной последовательности при несимметричном КЗ:

$$I_{2(n)} > I_{2откл}.$$

Условие работы отключающего органа по току нулевой последовательности при однофазных КЗ и двухфазных КЗ на землю:

$$3I_{0(n)} > 3I_{0откл}.$$

Условие работы отключающего органа по приращению тока прямой последовательности при несимметричных КЗ:

$$\Delta \dot{I}_{1(n)} = \dot{I}_{1(n)} - \dot{I}_{1(n-1)};$$

$$\Delta \dot{I}_{1(n)} > \Delta \dot{I}_{1откл}.$$

Условие работы отключающего органа по приращению тока обратной последовательности при несимметричных КЗ:

$$\Delta \dot{I}_{2(n)} = \dot{I}_{2(n)} - \dot{I}_{2(n-1)};$$

$$\Delta \dot{I}_{2(n)} > \Delta \dot{I}_{2откл}.$$

Характеристика срабатывания отключающего органа сопротивления в комплексной плоскости представляет собой параллелограмм с углом наклона правой и левой сторон φ_1 . Условие работы отключающего органа сопротивления при трехфазных КЗ:

$$x < X_{откл};$$

$$x > -0,1X_{откл};$$

$$r < R_{откл} + xtg \varphi_1;$$

$$r > -R_{откл} + xtg \varphi_1.$$

Проверка условий работы блокировки при качаниях:

$$\varphi_{12} \geq \varphi_{\text{ок}} - 180^\circ;$$

$$\varphi_{12} \leq 180^\circ - \varphi_{\text{ок}};$$

при выполнении этих условий блокировка дает разрешение на пуск защиты; $\varphi_{\text{ок}}$ – угол работы блокировки при качаниях.

Пуск защиты происходит, если:

- есть разрешающий сигнал из схемы блокировки при качаниях;
- при трехфазных КЗ – срабатывание отключающих органов фазного тока и сопротивления;
- при несимметричных КЗ – срабатывание отключающих органов тока обратной последовательности, утроенного тока нулевой последовательности, приращения

вектора тока прямой последовательности, приращения вектора тока обратной последовательности;

– для полных токов короткого замыкания в месте установки защиты и на противоположном конце линии выполняются следующие условия:

$$i_{st(n)} > 0 \text{ И } i_{st(n)np}$$

$$\text{ИЛИ } i_{st(n)} < 0 \text{ И } i_{st(n)np}.$$

Защита действует на выключатели по обоим концам линии.

Панель ДФЗ-201.

Условие срабатывания отключающего органа фазного тока при трехфазном коротком замыкании:

$$I_{(n)} > I_{откл}.$$

Условие срабатывания отключающего органа тока обратной последовательности при несимметричных КЗ:

$$I_{2(n)} > I_{2откл}.$$

Условие срабатывания отключающего органа тока нулевой последовательности при однофазных и двухфазных КЗ на землю:

$$3I_{0(n)} > 3I_{0откл}.$$

Условие срабатывания отключающего органа сопротивления при трехфазных КЗ формулируется следующим образом.

Характеристика срабатывания в комплексной плоскости представляет собой окружность. Координаты центра окружности:

$$r_0 = \frac{Z_{откл} - Z_{смIII}}{2} \cos \varphi_{мч};$$

$$x_0 = \frac{Z_{откл} - Z_{смIII}}{2} \sin \varphi_{мч};$$

здесь $Z_{смIII}$ – смещение характеристики в III квадрант.

$$A = (-Z_{смIII} \cos \varphi_{мч} - r_0)^2 + (-Z_{смIII} \sin \varphi_{мч} - x_0)^2;$$

$$B = (r - r_0)^2 + (x - x_0)^2.$$

Если выполняется соотношение $A \geq B$, отключающий орган сопротивления срабатывает.

Блокировка при качаниях дает разрешение на пуск защиты, если

$$\varphi_{12} \geq \varphi_{\text{бк}} - 180^\circ \text{ И } \varphi_{12} \leq 180^\circ - \varphi_{\text{бк}}.$$

Пуск защиты происходит, если:

– есть разрешающий сигнал от блокировки при качаниях;
– при трехфазных коротких замыканиях – сработали отключающие органы сопротивления и фазного тока;

– при несимметричных коротких замыканиях – сработали отключающие органы I_2 и $3I_0$;

– между полными токами КЗ в месте установки защиты и на противоположном конце линии соблюдаются следующие соотношения:

$$i_{st(n)} > 0 \text{ И } i_{st(n)np}$$

$$\text{ИЛИ } i_{st(n)} < 0 \text{ И } i_{st(n)np} < 0 \text{ И } i_{st(n)np}.$$

Защита действует на отключение обоих выключателей.

Разработанный программный модуль апробирован в условиях системы электроснабжения ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», содержащей

три замкнутых контура на напряжениях 110-220 кВ и несколько собственных электростанций суммарной мощностью около 640 МВт.