

# Способы повышения избирательности работы дифференциально-фазной высокочастотной защиты линий 110-220кВ.

ООО «НТЦ «Механотроника»  
Начальник отдела системотехники,  
ПИРОГОВ М. Г.

В России традиционно, в качестве основной быстродействующей защиты ЛЭП, при всех видах КЗ, в том числе и при неполнофазном режиме в цикле автоматического повторного включения (ОАПВ), используется дифференциально-фазная защита. Средний коэффициент правильной работы составляет 0,985.

Многолетний опыт эксплуатации в ряде энергосистем [1], показывает, что панели ДФЗ-201, ДФЗ-401, ДФЗ-402 имели случаи излишней работы при отключении внешних коротких замыканий (КЗ) защитами смежных линий. В тоже время, панель ДФЗ-2, имеющая время срабатывания выходного реле существенно больше указанных, не имела серьезных побочных действий. Первоначально, ещё при СССР, причины излишних срабатываний были исследованы в Иркутской и Свердловской энергосистемах, где была установлена связь между излишними действиями защит ДФЗ и изменением направления тока, протекающего по линии. Было также установлено, что излишнее действие защит происходит из-за появления одиночного импульса тока в цепи органа сравнения фаз ДФЗ, достаточного для срабатывания защиты. Поскольку явление связано с изменением направление тока, оно получило название «переворота фазы» или «реверс мощности».

Из практики эксплуатации известно, что случаи излишней работы ДФЗ, связанные с "переворотом фазы", редки. Одна и та же защита при большей части внешних КЗ отрабатывает правильно и лишь иногда может сработать излишне. Ввиду редкости этих случаев их объясняют "некоторыми различиями характеристик блоков манипуляции, а также трансформаторов тока по концам линии, что в условиях переходного процесса в сети при отключениях КЗ вызывает в совокупности кратковременную неидентичность переходного процесса на выходе блоков манипуляции". Для предотвращения излишних действий защиты предлагалось вводить замедление защиты, либо с помощью блока автоматического замедления БФКЦ, разработанного ВНИИЭ, либо просто увеличением времени срабатывания выходного реле ДФЗ. Из этого можно сделать предварительный вывод, что для срабатывания защиты достаточно различий в настройке органов манипуляции в пределах допусков, указанных в инструкции по наладке. Поэтому считается, что устранить причину появления импульса тока приема нельзя, можно лишь предотвратить излишнее срабатывания при появлении одиночного импульса ценой снижения быстродействия защиты. Аналогичные действия многие производители применяют и в ДФЗ, выполненных на современных цифровых устройствах.

Ввод замедления ухудшает параметры ДФЗ, что может привести к нарушению п.3.2.108 действующих ПУЭ [2]. Поэтому целесообразными способами улучшения работы ДФЗ при всех видах КЗ, является не её замедление, а совершенствование работы алгоритмов и ключевых узлов: органа манипуляции и органа сравнения фаз (ОСФ), каналов измерения и передачи информации.

Хотя статья и посвящена ДФЗ, перечень вопросов, требующих рассмотрения для совершенствования известного принципа очень широк, поэтому далее будут кратко рассмотрены лишь некоторые из них.

Рассмотрим доступные способы повышения точности работы ДФЗ. В цифровых ДФЗ ЛЭП 110-220кВ мгновенное значение тока манипуляции на текущем шаге дискретизации, может быть выражено следующим универсальным выражением:

$$I_M(j) = I_1(j) + k \cdot I_2(j)$$

После преобразования с учётом перехода к мгновенным отсчётам фазных токов, более качественный результат работы органа манипуляции (без задержки) даёт исходное выражение:

$$\begin{aligned} I_1(j) &= \frac{1}{3} I_a(j) + \frac{1}{3} \left( \sum_{k=1}^{n-1} \prod_{g=1}^k A_g \right) I_b(j) - \frac{1}{3} \left( \sum_{k=1}^{n-1} \prod_{g=1}^k A_g + 1 \right) I_c(j) - \frac{1}{3} \prod_{g=1}^n A_g \cdot \left( I_b(j - \frac{120^0}{2^n}) - I_c(j - \frac{120^0}{2^n}) \right) \\ I_2(j) &= \frac{1}{3} I_a(j) - \frac{1}{3} \left( \sum_{k=1}^{n-1} \prod_{g=1}^k A_g + 1 \right) I_b(j) + \frac{1}{3} \left( \sum_{k=1}^{n-1} \prod_{g=1}^k A_g \right) I_c(j) + \frac{1}{3} \prod_{g=1}^n A_g \cdot \left( I_b(j - \frac{120^0}{2^n}) - I_c(j - \frac{120^0}{2^n}) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Где,  $I_M(j)$  - значение тока манипуляции на текущем шаге дискретизации  $j$ , А;

$k$  - коэффициент цифрового фильтра (обеспечивает надёжное формирование тока манипуляции при всех видах КЗ);

$n$  - параметр, задающий интервал определения достоверных расчётных значений симметричных составляющих (максимальное значение  $n$  ограничено числом отсчётов  $N$  на периоде выражением  $2 \leq n \leq \log_2 \frac{N}{3}$ );

$I_1(j)$  - достоверное мгновенное значение тока прямой последовательности, А;

$I_2(j)$  - достоверное мгновенное значение тока обратной последовательности, А;

Из выражений (1) ясно видно, что применяемые в настоящее время частоты дискретизации (ЧД) ( $N=24, 48$ ) в цифровых устройствах защиты и автоматики (РЗА) будут формировать достоверное значение фазы тока манипуляции в момент перехода через «0» с задержкой по времени. Например, при частоте 48 отсчётов на периоде максимально возможная задержка изменения фазы тока манипуляции будет составлять 7,5 электрических градусов. А с учётом асинхронной работы полукомплектов это приводит к дополнительной «ложной» паузе, что относительно уставки ОСФ равной 30 электрических градусов - существенно. Разница в один дискретный отсчёт приводит к искажению фазы тока манипуляции, в том числе и при переходных процессах в энергосистеме. Таким образом, одним из качественных способов повышения точности формирования  $I_M(j)$  в момент перехода через «0» и, как дальнейшее условие возможности повышения точности работы ОСФ, является увеличение частоты дискретизации органа манипуляции и самого органа сравнения фаз.

Рассмотрим индивидуальные условия, обеспечивающие срабатывание ОСФ по углу блокировки  $\Phi_{бл}$  каждого полукомплекта с относительной погрешностью не более  $\delta \pm 2,5\%$  (в настоящий момент  $\delta$  ОСФ отечественных производителей составляет  $\pm 20\%$  и более!):

1. Оценка суммарной паузы (ВЧ-приём) на периоде должна выполняться со следующей частотой дискретизации:

$$fd = \frac{360}{\Phi_{бл} \cdot \delta} \cdot f = \frac{360}{30 \cdot 0.025} \cdot 50 = 24000 \text{ Гц} \quad (2)$$

2. Формирование тока манипуляции  $I_M(j)$ , соответственно, должно производиться при частоте дискретизации не менее  $fd$ ;

3. Разнотипные характеристики измерительных аналоговых трактов обоих полукомплектов (применение разных производителей РЗА, разных типов трансформаторов тока) повышают погрешность формирования фазы тока  $I_M(j)$ , органа манипуляции (ОМ). В этом случае в цифровом устройстве РЗА должен быть предусмотрен дополнительный механизм компенсации этой погрешности с шагом 0.75 эл. град, что соответствует  $fd$ . Отметим, что данная возможность необходима и для других задач, например, применение полукомплектов разных производителей.

Частота дискретизации современных цифровых устройств РЗА составляет 1200, 2400, 4800 Гц, что значительно ниже 24000 Гц. Данный фактор не позволяет осуществлять качественное формирование  $I_M(j)$  и, как следствие, делает бесполезным выполнение высокоточного (в том числе и интегрального) ОСФ.

На аппаратную точность формирования тока манипуляции влияет погрешность измерения аналоговых сигналов самим устройством. Необходимо отметить, что системы, имеющие меньшую погрешность измерения фазных токов, конечно же, формируют ток манипуляции точнее.

Динамический диапазон измерения органа формирования  $I_M(j)$  также имеет большое значение. Под динамическим диапазоном аналогового тракта понимают отношение верхнего предела измерения к нижнему. В цифровой защите – это всегда компромиссный параметр. С одной стороны, существуют задачи, в которых необходимо измерять низкий уровень тока (например, реле минимального тока УРОВ, сторона ВН силовых трансформаторов при реализации ДЗТ), а с другой стороны увеличение верхнего предела для выполнения корректной цифровой обработки сигналов при КЗ. Применительно к ДФЗ для повышения точности формирования фазы тока манипуляции необходимо как снижение нижнего предела измерения каналов токов, так и повышение верхнего предела измерения. Среди отечественных производителей РЗА наилучшим динамическим диапазоном является 1000 (например, 0,25÷250А или 0,5÷500А), отметим, что западные производители зачастую вообще не достигают этого параметра.

Применительно к ДФЗ нижний предел измерения 0,25А означает, что, например, при снижении мгновенного значения тока фазы А ниже 0,25А, величина  $I_a(j)$ , участвующая в расчётах  $I_M(j)$ , отклоняется (или вообще не измеряется приравниваясь к нулю) от нормированных для конкретного цифрового устройства РЗА погрешностей, находится в области S1, что вносит отрицательный вклад в формирование фазы тока манипуляции (см. рисунок 1). Устройство с более низким пределом измерений имеет меньшую площадь неопределенности S2 и вносит меньший отрицательный вклад в  $I_M(j)$ . Таким образом, ещё одной дополнительной мерой повышения качества работы ДФЗ является увеличение динамического диапазона измерения каналов тока для органа формирования тока манипуляции.

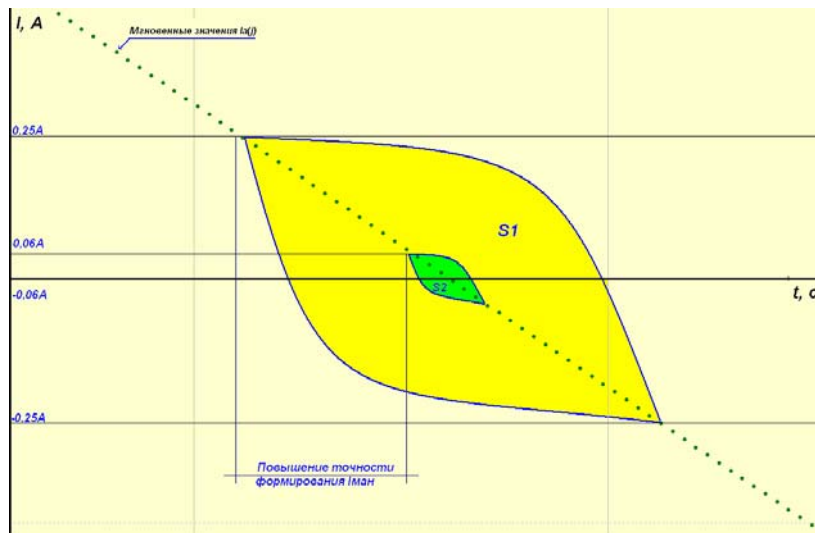


Рисунок 1, повышение точности формирования фазы  $I_M(j)$  за счёт снижения нижнего предела измерений РЗА

Помимо точного формирования фазы тока манипуляции должен быть рассмотрен вопрос точности и качества её измерения. ОСФ должен иметь механизм корректной работы в условиях наличия помех. На основании [4, 5], помехи при коммутационных операциях имеют значительный уровень и обуславливаются переходными процессами, возникающими при пробое промежутка между контактами выключателя и разъединителя и при восстановлении изоляционных свойств этого промежутка. При горении дуги может произойти образование помех, при этом следует выделять три фазы:

- Первая фаза характеризуется пиковым напряжением помех на ВЧ-кабеле до 100В, а на выходе полосового фильтра с полосой пропускания около 4кГц – до 15÷30дБ;
- Вторая фаза характеризуется резким уменьшением уровня помех относительно первой фазы. Помехи носят характер резких всплесков, с пиковым уровнем в полосе 4кГц, не более 0,5дБ;
- Третья фаза обусловлена отключением места КЗ выключателем и гашением дуги. Интенсивность помех в этой фазе аналогична первой;

Уровень возможных помех сопоставим с уровнем сигнала приёма, этим пренебрегать нельзя. А длительность единичной помехи, вносящей искажение во входной сигнал ОСФ, в каждом из приведенных режимов не превышает 2-3мс.

Рассмотрим некоторые способы повышения качества работы ОСФ.

1. Повышение частоты дискретизации входного сигнала ОСФ. Согласно (2), для срабатывания ОСФ по углу блокировки  $\Phi_{бл}$  каждого полукомплекта с относительной погрешностью не более  $\delta \pm 2,5\%$ , частота дискретизации ОСФ должна быть не менее 24кГц;
2. Выполнение ОСФ на интегральном принципе позволит правильно работать защите при всех видах КЗ, как в зоне действия, так и вне её. Интегральный ОСФ может быть выражен как:

$$\Phi_j = \frac{360}{N} \cdot \left( N - \sum_{i=0}^{N-1} B_{j-i} \right) \quad (3)$$

где:  $N$  – число отсчетов дискретизации входного сигнала на период основной частоты

$B$  – сигнал быстродействующего входа «ПРИЕМ ВЧ» (1=есть сигнал, 0=нет сигнала);

$\Phi_j$  – расчётная пауза на входе ОСФ

Из выражения (3) видно, что чем выше частота дискретизации, тем точнее определяется  $\Phi_j$ .

Особенностью принципа интегрального ОСФ, выполненного на высокой частоте дискретизации, является минимизация влияния кратковременных помех как аддитивного, так и субтрактивного характера, что представлено на рисунке 2. Дополнительным плюсом является то, что заблаговременно выполненное высокоточное интегрирование не приводит к значительному замедлению действия защиты.

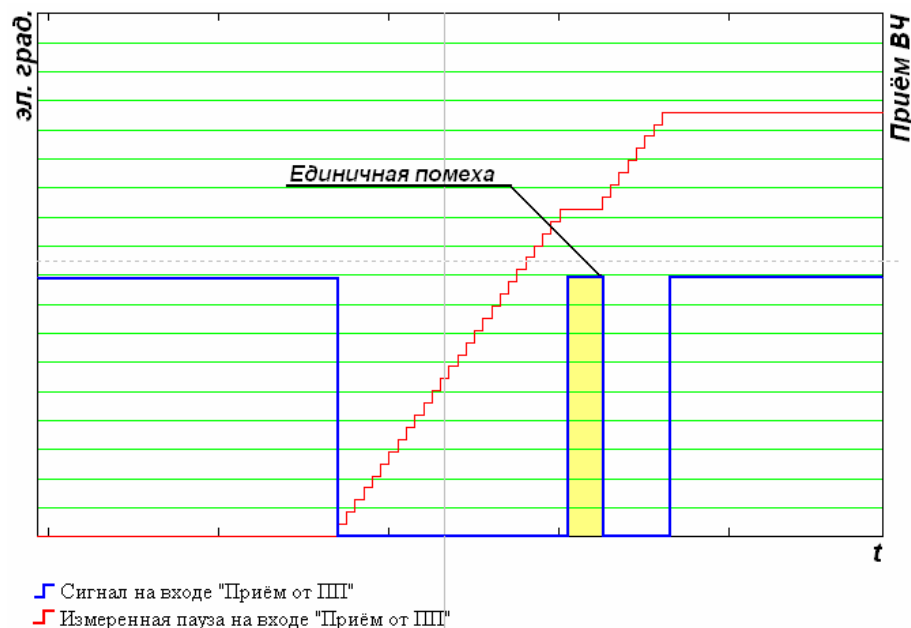


Рисунок 2, особенности работы интегрального ОСФ в условиях единичной помехи на входе

Необходимо отметить, что косвенным ограничением ЧД цифровой ДФЗ является время задержки и погрешность задержки приёмопередатчика (время реакции). Для современных цифровых устройств этот параметр составляет порядка 100мкс. Это является стимулом совершенствования существующих приёмопередатчиков, составляющих неотъемлемую часть ДФЗ.

3. Отсутствие дополнительных источников питания в цепи приёмопередатчика и ДФЗ, применение экранированного кабеля с заземленным экраном с обеих сторон;
4. Повышение качества функционирования аппаратной части входов выходов РЗА предназначенных для взаимодействия с приёмопередатчиком (уменьшение времени реакции, повышение стойкости к перенапряжению);
5. Применение системы цифровой передачи информации по оптическому каналу между устройством РЗА и приёмопередатчиком (в настоящее время данная идея обсуждается очень активно);

Несмотря на известный и десятилетиями опробованный принцип, дифференциально-фазная защита не достигла предела своего совершенства. В цифровых устройствах РЗА ДФЗ может быть кардинально улучшена. Останавливаться на достигнутом не следует.

Конечно, выполнение вышеописанных требований является сложной инженерной задачей и для некоторых производителей может оказаться недостижимой, так как потребует смены применяемой элементной базы, аппаратной архитектуры, программного обеспечения. Однако предпосылки для следующего шага отечественных производителей вперед уже созданы: ООО «НТЦ «Механотроника» выпустило новый серийно выпускаемый блок БМРЗ-ДФЗ в котором реализованы вышеописанные принципы: частота дискретизации ОМ и интегрального ОСФ  $N=768$  отсчётов на период промышленной частоты, с динамическим диапазоном измерений 4000, с допускаемой относительной основной погрешностью измерения фазного тока  $\pm 2,5\%$  и абсолютной погрешностью срабатывания по угловым величинам ОСФ  $\delta \pm 0,5^\circ$ , ОМ  $\pm 3^\circ$ . Для цифровых РЗА совокупность этих параметров является первым мировым серийным прецедентом, а особенности устройства заслуживают рассмотрения в отдельной статье.

#### **Выводы:**

- Замедление ДФЗ с целью компенсации кратковременной неидентичности переходного процесса на выходе блоков манипуляции для цифровых РЗА является не оптимальной мерой;
- Повышение качества принципиального функционирования ДФЗ целесообразно решать за счёт повышения точности измерений, а так же через совершенствование работы органа манипуляции и органа сравнения фаз;
- Применение более высоких частот дискретизации для органа манипуляции и интегрального ОСФ, увеличение динамического диапазона измерений, снижение погрешности измерений повышает избирательность действия ДФЗ в сложных переходных режимах и без ущерба для быстродействия;
- В качестве дополнительной меры для повышения избирательности работы ДФЗ, при наличии высокоточного ОМ и ОСФ, идентичности устанавливаемых полуккомплектов целесообразно рассматривать вопрос о повышении минимальной уставки по углу блокировки.

1. Департамент науки и техники РАО «ЕЭС России». Циркуляр №Ц-04-94(Э), 30.12.1994;
2. Действующие Правила Устройства Электроустановок;
3. Руководящие указания по релейной защите, выпуск 9. Москва, «Энергия» 1972г.
4. Шкарин Ю. П. Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи. Ч. 2. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 8(32)];
5. Бобров С. Е. Разработка и исследование органа сравнения фаз дифференциально-фазной защиты линии напряжением 110-220кВ, «Вестник ИГЭУ» выпуск 2, 2009;