

Автор:

к.т.н. Ефремов В.А.,

ООО «ИЦ «Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия.

V.A. Efremov

LLC «RS «Bresler»,
Cheboksary, Russia.

ОАПВ: ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ SINGLE-PHASE AUTO-RECLOSING: EXPERIENCE IN DEVELOPING AND APPLYING

Аннотация: рассмотрены проблемы создания устройства однофазного автоматического повторного включения и пути их решения.

Ключевые слова: однофазное автоматическое повторное включение, адаптивное ОАПВ, орган контроля дуги подпитки, токовый избиратель поврежденных фаз и вида повреждения.

Annotation: in this article problems in development of single-phase auto-recloser are shown and solutions are given.

Keywords: single-phase automatic reclosing, adaptive single-phase auto-reclosing, control of feeding arc, faulted phase and damage type selector



Ефремов

Валерий Александрович

Кандидат технических наук, директор Центра применения продукции ООО «ИЦ «Бреслер». Доцент кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета. Защищал в 1993 г. кандидатскую диссертацию на тему «Адаптивный дистанционный принцип и средства его реализации» в Санкт-Петербургском техническом университете.

Эффект работы однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) не подвергается сомнению. Статистика сегодняшних дней [1] и советских времен [2] подтверждают данный тезис. ОАПВ является одним из способов повышения надежности электроснабжения потребителей и отлично вписывается в концепцию построения сетей «Smart Grid». Известно, что большинство повреждений на линиях электропередачи (ЛЭП) носит неустойчивый характер и может быть ликвидировано устройством ОАПВ.

Создание микропроцессорного устройства (функции, модуля) ОАПВ и режимы, возникающие в цикле ОАПВ, ставят перед разработчиками множество проблем. В первую очередь следует отметить, что меняется сама идеология построения системы ОАПВ: вместо одного устройства ОАПВ, через которое происходило отключение и повторное включение поврежденной фазы (см., например, АПВ-500 или ПДЭ 2004.01) в микропроцессорном (МП) варианте используются несколько одинаковых функций ОАПВ в различных устройствах линейных защит и в автоматике управления выключателем, тем самым повышается не только надежность функционирования системы защит, но и возникают к такому построению ОАПВ дополнительные требования по селективности действия защит и необходимость передачи информации между всеми функциями (модулями) ОАПВ.

Анализ многообразия задач, решаемых при создании устройства ОАПВ, выделяет несколько наиболее значимых, таких как:

- задача пуска и фиксации ОАПВ;
- задача выявления поврежденных фаз и вида повреждения;
- защита неповрежденных фаз в цикле ОАПВ;
- определение момента повторного включения по расчетной или адаптивной паузе;
- выявление успешности включения;
- проблема быстрого действия при неуспешном

включении;

- проблема возможных перенапряжений на линии при отключении линии тремя фазами в режимах запрета ОАПВ, непогасании дуги подпитки, неуспешном ОАПВ и др.

Решение перечисленных задач в устройствах микропроцессорного ОАПВ можно выполнить двояко – традиционно, когда в качестве информационной базы применены токи и напряжения. Такой подход в микропроцессорном ОАПВ оптимален еще и тем, что он позволяет выполнить ряд дополнительных функций, связанных с применением адаптивного ОАПВ, т.е. такого ОАПВ, длительность паузы ОАПВ которого зависит от текущего состояния линии.

Другой подход заключается в том, что МП ОАПВ позволяет обойтись без цепей напряжения, при этом выполняя полный цикл ОАПВ с расчетной паузой. Указанные два подхода реализованы в концепции построения ОАПВ, принятой в ООО «ИЦ «Бреслер». В первом случае предполагается использование всей доступной информационной базы, включающей токи и напряжения текущего и предшествующего режимов. Второй случай возможен при потере цепей напряжения в устройстве. Однако в таком режиме устройство остается полностью работоспособным. В нем блокируются только измерительные органы (ИО), в алгоритм действия которых входят цепи напряжения, а функция ОАПВ способна выполнить полный цикл «Отключение – ОАПВ – отключение при неуспешном ОАПВ». Дальнейшее дано в соответствии с указанной концепцией.

Задача пуска и фиксации ОАПВ. До эры МП защит в качестве пускового органа использовалось комбинированное реле тока и напряжения нулевой последовательности [см., например, ПДЭ-2004]. Очевидно, что эти два реле дополняли друг друга для режимов с мощной системой «за спиной» и повреждениях через большие переходные сопротивления при недо-

статочной чувствительности соответственно напряженческих и токовых ИО. Сегодня известны решения ОАПВ для случаев междуфазных повреждений [3], когда комбинированное реле нулевой последовательности не может срабатывать. Эффективным пусковым органом для защит при несимметричных повреждениях является универсальный токовый орган, реагирующий на сумму модулей токов обратной и нулевой последовательности $I_{20} = |I_2| + |I_0|$. Такие ИО показали высокую надежность в эксплуатации и полностью вписываются в принятую концепцию построения ОАПВ. Аналогичные органы применены во многих защитах «ИЦ «Бреслер», в т.ч. и в МП ДФЗ на ЛЭП-500 при замене ДФЗ-503, когда наблюдается недостаточная чувствительность токовых пусковых/отключающих ИО, реагирующих на составляющие обратной последовательности. Следует отметить, что параметр срабатывания (уставка защиты) данного комбинированного ИО отстраивается от небалансов и в заводских бланках уставок для защит с абсолютной селективностью и ОАПВ назначено $I_{20уст} = 7\% I_{ном}$ без предложения его пересчета.

Задача выявления поврежденных фаз и вида повреждения. Классическое ОАПВ предполагает наличие в своем составе дистанционных избирательных органов (ДИО), построенных на реле сопротивления со сложными круговыми для электромеханических или микроэлектронных ОАПВ или многоугольными характеристиками для МП ОАПВ. Известны сложности расчета уставок ДИО, ограничения по чувствительности, наличие «мертвых зон», проблемы с направленностью при близких повреждениях и др. В то же время еще на заре создания микроэлектронных ОАПВ были попытки использования в качестве избирателей токовые ИО симметричных составляющих – фильтровые избирательные органы (ФИО). Такие работы были проведены во ВНИИЭ Стрелковым В.М, Фокиным Г.Г., Якубсоном Г.Г. Анализируя устройства выбора поврежденных фаз и вида повреждения, в основу которых положены фазовые соотношения между симметрич-

ными составляющими, следует сказать, что они не всегда могут быть отстроены от нагрузочного и некоторых аномальных режимов, но в них заложена принципиальная возможность обеспечения большей чувствительности к переходным сопротивлениям по сравнению с ДИО. Устройства определения поврежденной фазы на базе ФИО в основном нацелены на определение поврежденной фазы при К(1). При возникновении качаний (асинхронного хода) селективность указанных способов резко снижается, что явилось причиной отказа от их практического применения.

Возрождение токовых избирателей стало возможно в эпоху применения МП защит, которые с точки зрения алгоритмов позволили применить информацию о предшествующем режиме и получить тем самым чисто аварийные составляющие на значительном (до 40 мс и более) промежутке времени.

Вот уже более 10 лет «ИЦ «Бреслер» предлагает избиратели, которые построены только на токовом принципе. Замечательной особенностью таких избирателей является то, что они не требуют расчета параметров срабатывания. Их чувствительность ограничена только небалансами измерительных трансформаторов тока, которые обычно не превышают 5% номинального тока. В качестве основного информационного параметра токовых избирателей поврежденных фаз и вида повреждения (ИПФ) выступают аварийные составляющие фазных токов и их аварийных симметричных составляющих, которые получены как разность между величинами текущего и предшествующего режимов:

$$\begin{aligned} i_V^{aa}(t) &= i_V(t) - i_{V\text{пред}}(t); \\ u_V^{aa}(t) &= u_V(t) - u_{V\text{пред}}(t); \\ i_{1V}^{aa}(t) &= i_{1V}(t) - i_{1V\text{пред}}(t); \\ i_{2V}^{aa}(t) &= i_{2V}(t) - i_{2V\text{пред}}(t); \\ i_0^{aa}(t) &= i_0(t) - i_{0\text{пред}}(t), \end{aligned}$$

где $v = A, B, C$.

Часто аварийные составляющие называются чисто аварийным (коммутационным) током или напряжением или величинами по приращению.

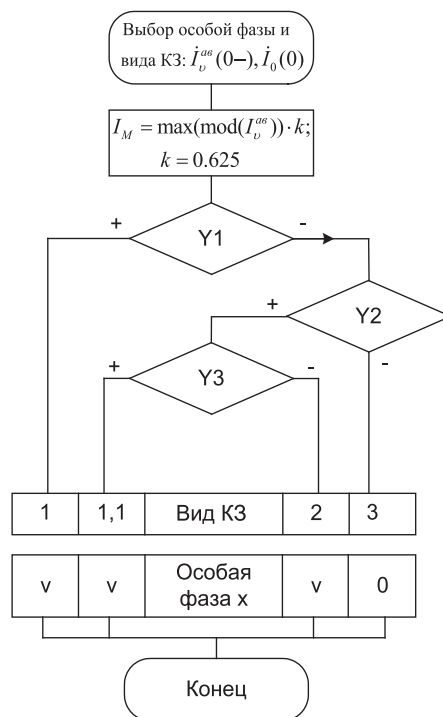


Рис. 1. ИПФ на базе аварийных составляющих.

$$\begin{aligned} Y1: & I_v^{aa} > I_M, (I_{v-1}^{aa} \& I_{v+1}^{aa}) < I_M \\ Y2: & I_v^{aa} < I_M, (I_{v-1}^{aa} \& I_{v+1}^{aa}) < I_M \\ Y3: & \text{mod}(I_0(0)) < I_y \end{aligned}$$

Алгоритмы с применением аварийных составляющих можно строить как с использованием абсолютных значений аварийных токов, так и с использованием угловых соотношений между безнулевыми (центрированными) аварийными составляющими и током I_0 [5] (рис. 1).

Определение уставки для всех видов повреждений можно выполнить по условию

$$I_y = k_y \{ \max[\text{mod}(I_A^{aa}), \text{mod}(I_B^{aa}), \text{mod}(I_C^{aa})] \}$$

где k_y – расчетная величина, зависящая от типа линии, вида повреждения, величины переходного сопротивления R_f и других параметров. Приблизненно

$$k_y = K_3 \cdot \frac{Z_1}{Z_0 \cdot (1 + \frac{Z_{C2}}{Z_1})}$$

где Z_1, Z_0 – модули сопротивлений прямой и нулевой последовательности эквивалентных систем, Z_{C2} – сопротивление



ние прямой последовательности дальней от места установки защиты эквивалентной системы, $K_3 = 1.1 - 1.3$ – коэффициент запаса. В общем случае для линии 220-500 кВ $k_y = 0.625$ является константой для защиты на рис. 1 и не подлежит изменению и расчету.

Основной недостаток ИПФ на основе аварийных составляющих заключается в их зависимости от применяемого порядка фильтра аварийных составляющих (ФАС) [6]. При первом включении (или ОЛ) и ТАПВ, когда токи предшествующего режима нулевые, ФАС в течение времени, определяемого порядком фильтра (обычно 10 мс для ФАС 1-го порядка и 30 мс для ФАС 3-го порядка), сравнивает текущие значения токов с нулевыми значениями и выдает в этом переходном режиме текущие значения величин как аварийные. Такая особенность алгоритма ФАС предопределяет его блокировку на время собственного переходного процесса при первом опробовании линии напряжением или ТАПВ. Следует заметить, что в указанных режимах ОЛ и ТАПВ, когда возможна блокировка ИПФ по аварийным составляющим, производится всегда отключение линии тремя фазами, а результаты работы избирателя могут быть использованы только для анализа неуспешного включения.

Для защиты неповрежденных фаз в цикле ОАПВ должны быть предусмотрены основная и резервная защиты. Первая из них строится на основе защиты с абсолютной селективностью линии или с ускорением второй ступени дистанционной защиты от всех видов повреждения, которая должна быть отстроена от качаний (асинхронного режима) в цикле. В качестве резервной защиты в цикле ОАПВ обычно выступает токовая защита неповрежденных фаз (ТЗНФ), построенная по отношению токов, оставшихся в работе фаз [7]. Однако, как показано в [8], она обладает недостаточной чувствительностью и требует дополнительной отстройки от ложных срабатываний в неполнофазных режимах с малыми углами пере-

дачи мощности. В устройствах ОАПВ «ИЦ «Бреслер» для резервной защиты неповрежденных фаз в неполнофазном режиме цикла ОАПВ предназначен **комбинированный ИО приращенного модуля вектора тока обратной и нулевой последовательностей** $[\Delta(I_2+I_0)]$, который за счет адаптивности в цикле отстроен от ложных срабатываний и обладает значительно лучшей чувствительностью по сравнению с алгоритмом, построенным по отношению токов оставшихся в работе фаз [8].

Кроме того, в устройстве ОАПВ «ИЦ «Бреслер» предусмотрена возможность реализации ТЗНФ с привлечением дифференциально-фазного принципа, что позволяет получить абсолютную селективность для таких защит в неполнофазном режиме. ТЗНФ вводится в работу в начале неполнофазного режима цикла ОАПВ. При срабатывании этого ИО происходит отключение трех фаз.

Задача определения момента повторного включения. С началом применения микропроцессорных устройств ОАПВ в полной мере, стала реальной идея повторного включения повреждающейся фазы не только по расчетной, но и адаптивной паузе [3].

Известно, что выдержка времени ОАПВ, определяющая длительность бестоковой паузы, выбирается по наилучшим условиям для погасания дуги подпитки и деионизации ее канала, и которая в большинстве случаев получается неоправданно завышенной, а успешное ОАПВ осуществляется значительно позже того момента, когда оно могло бы произойти. Контроль погасания дуги начинается по истечении определенной выдерж-

ки времени, отсчитываемой от начала фиксации цикла ОАПВ. Это время может определяться, например, временем готовности выключателя к повторному включению или временем отстройки от переходного процесса, связанное с горением дуги подпитки или условиями работы системы в неполнофазном режиме.

В общем случае бестоковая пауза ОАПВ должна отвечать двум условиям:

- условию восстановления электрической прочности канала дуги после обрыва тока короткого замыкания при работе выключателей линии (линия без реакторов). При этом задержка на повторное включение: $t_{\text{ОАПВ}} \geq 0.5 + 1.0 \text{ с};$
- условию восстановления электрической прочности после гашения дуги подпитки на линиях с шунтирующими реакторами: $t_{\text{ОАПВ}} \geq t_{\text{дуги}} + (0.5 + 1.0) \text{ с}.$

Такое ОАПВ носит название ОАПВ с расчетной паузой. Применяемая в настоящее время практика использования ОАПВ позволяет выполнять повторные включения линии на неустранившиеся или устойчивые повреждения, что утяжеляет условия работы силового и коммутационного оборудования, ухудшает динамические характеристики энергосистемы в аварийных режимах. Устранению этого недостатка способствует автоматический контроль состояния фазы, отключенной в цикле ОАПВ, позволяющий блокировать включение на неустранившееся повреждение, а также сократить до минимума паузу ОАПВ при самоликвидации повреждения. Такие функции выполняет орган контроля погасания дуги подпитки (ОКПД) [9], который позволяет реали-

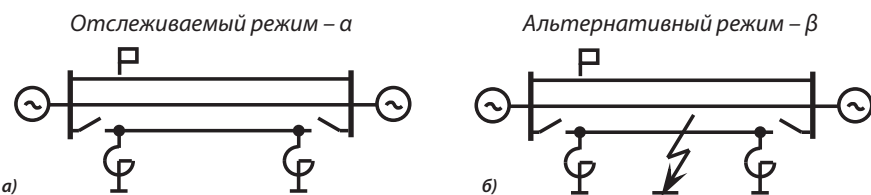


Рис. 2. Перечень режимов для ОКПД
 а) Отсутствие замыкания на отключенной с двух сторон фазе;
 б) Наличие замыкания на отключенной с двух сторон фазе.



зовать ОАПВ с адаптивной паузой. В этом случае на включаемом втором конце линии вводят в действие орган выявления успешности включения (ОВУВ) [4], который блокирует включение второго конца линии при неуспешном АПВ на первом конце, тем самым предотвращая повторное включение на устойчивое замыкание. Данные измерительные органы реализованы в функциях ОАПВ микропроцессорных защит «ИЦ «Бреслер» [10].

Рассмотрим методику расчета временных задержек адаптивного ОАПВ. К ОКПД предъявляют следующие требования:

- орган должен надежно срабатывать, когда на отключенной в цикле ОАПВ фазе отсутствует короткое замыкание (рис. 2, а);
- орган не должен срабатывать, когда на отключенной в цикле ОАПВ фазе имеется короткое замыкание (рис. 2б).

Бестоковая пауза «адаптивно-го» повторного включения задается выражением

$$t_{\text{ОАПВ}} = t_{\text{зад}} + t_{\text{дуги}} + t_{\text{деиониз}} + t_{\text{вкл}} + t_{\text{упр}} \leq t_{\text{пред}}$$

где $t_{\text{зад}}$ – задержка на ввод в работу «адаптивного» органа относительно момента отключения фазы линейных выключателей;

$t_{\text{дуги}}$ – время горения дуги подпитки, определяемое ИО ОКПД;

$t_{\text{деиониз}}$ – время, задаваемое на деионизацию канала дуги подпитки для отстройки от возможного повторного пробоя дугового промежутка;

$t_{\text{вкл}}$ – время включения

выключателя;

$t_{\text{упр}} = 0 \div 0,3 \text{ с}$ – необходимая задержка для получения требуемой очередности повторного включения фаз выключателей по концам линии;

$t_{\text{пред}} \leq 2,5 \div 3,0 \text{ с}$ – предельно допустимая по условиям устойчивости пауза ОАПВ, ограниченная сверху из соображения, что дуга, не погасшая за $t_{\text{пред}}$ будет гореть устойчиво и необходимо выполнить доотключение неповрежденных фаз.

При выборе $t_{\text{зад}} \geq 0,5 \text{ с} - (t_{\text{деиониз}} + t_{\text{вкл}}) \approx 0,3 \text{ с}$ исходят из необходимости при мгновенном гашении дуги подпитки выждать до повторного включения, примерно $t_{\text{ОАПВ}} \approx 0,5 \text{ с}$, чтобы успела восстановиться электрическая прочность канала дуги тока КЗ. Эта же задержка практически перекрывает возможное время затухания аperiодической составляющей тока подпитки.

Выводы

1. Предложена концепция выполнения устройства ОАПВ без привлечения цепей напряжения.

2. Разработанные алгоритмы избирателя поврежденных фаз и вида повреждения на базе аварийных величин обладают высокой чувствительностью к переходным сопровствлениям и не требуют расчета параметров срабатывания защиты.

3. Токовая защита неповрежденных фаз срабатывает селективно при повреждении фаз в цикле ОАПВ.

4. Адаптивное ОАПВ позволяет повысить динамическую устойчивость энергосистемы.

Литература

1. Анализ работы устройств РЗА ЕНЭС в 2012 году / Кузьмичев В.А., Сахаров С.Н. – Сб. тез. докл. II междунароная научн.-практ. конф. «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России». – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2013. С. 56-57.
2. Беляков Н.Н., Рашкес В.С., Левинштейн М.Л., Хорошев М.И. Перспективы применения ОАПВ в электропередаче 1150 кВ. Сб. статей «Электропередачи 1150 кВ» в 2-х кн. Кн.1. М.: Энергоатомиздат, 1992. С. 129-159.
3. Концепция построения дифференциально-фазной защиты ЛЭП/Григорьев О.Н., Ефремов В.А., Козлов В.Н., Лямец Ю.Я., Подшивалин Н.В., Нудельман Г.С. – Сб. тез. докл. XV научн.-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем 2002». – М.: ЦДУ ЕЭС России. 2002. С. 91-93.
4. Стрелков В.М., Фокин Г.Г., Якубсон Г.Г. Основные принципы выполнения многофункционального устройства АПВ ВЛ 1150 кВ. В кн. «Перенапряжение, конструкции и радиопомехи в электропередачах 1150 кВ» Сб. научных трудов ВНИИЭ. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 61-66.
5. Ефремов В.А. Адаптивный дистанционный принцип и средства его реализации. Автореферат диссертации. Чебоксары 1993г. 24 с.
6. А.с. Лямец Ю.Я., Ефремов В.А. Способ выделения аварийной слагаемой тока короткого замыкания. Патент 2058747 Россия БИ № 12, 1996.
7. Коржецкая Т.А., Левиш А.И. Некоторые принципы выполнения резервной защиты в цикле ОАПВ // Электричество. – 1978, № 8. – С. 81-84.
8. Ефремов В.А., Романов Ю.В., Воронов П.В. Токовая защита неповрежденных фаз в цикле ОАПВ. // Электроэнергия. Производство и распределение. – 2013, № 3 (18). – С. 104-106.
9. Хорошев М.И., Ковалев Б.И., Калинин А.Ф., Ильин В.А. Устройство для контроля за погасанием дуги подпитки на линиях электропередачи // Электромеханика. 1985. – № 10. – С. 22-25.
10. Ефремов В.А. Защиты абсолютной селективности серии «Бреслер». Часть 2. Основная защита линий с ОАПВ // Энерго-Info. – 2008. – № 9. – С. 70-73.

anCom

ИЗШ-75

ООО «Аналитик-ТС»
125424 Москва, Волоколамское шоссе, 73
Тел./факс: (495) 775-60-11
info@analytic.ru • www.analytic.ru

Имитатор затухания и шума в ВЧ тракте

Предназначен для решения задач в соответствии со СТО 56947007- 33.040.20.141-2012 «Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, автоматики, дистанционного управления и сигнализации» СТО 56947007- 33.060.40.134-2012 «Типовые технические решения по системам ВЧ связи»

- проверка двух полукомплектов ВЧ аппаратуры через искусственную линию в лабораторных условиях
- определение запаса по затуханию действующего канала с включением имитатора затухания на приемной/передающей стороне
- обеспечение проверки помехоустойчивости аппаратуры передачи команд РЗ и ПА при скачкообразном увеличении затухания ВЧ тракта на 22 дБ и воздействия на приемник помех типа белого шума с соотношением сигнал/помеха 6 дБ в полосе 4 кГц
- ослабление высоких уровней для подключения измерительного оборудования



anCom ИЗШ-75 может использоваться самостоятельно либо в составе ВЧ лаборатории*

*ВЧ лаборатория – автономный измерительный комплекс для проверки аппаратуры ВЧ связи. Состав комплекса: anCom А-7/307, anCom А11/Г, anCom ИЗШ-75, anCom TDA-9, anCom Е-9.