

Адаптивная быстродействующая защита линии при неуспешном ОАПВ

УДК 621.316.925

В статье рассмотрены вопросы применения быстродействующей адаптивной токовой защиты для линий с пофазным управлением выключателями при неуспешном однофазном автоматическом повторном включении (ОАПВ). Приведена методика расчета параметров срабатывания защиты в зависимости от текущего нагрузочного режима.

Ефремов В.А.,

к.т.н., доцент кафедры
ТОЭ и РЗА ЧувГУ
им. И.Н. Ульянова,
директор центра
применения продукции
ООО «Релематика»

Ефремов А.В.,

инженер-исследователь
3 категории
ООО «Релематика»

Быстродействие защит с абсолютной селективностью при отключении повреждения на линиях электропередачи (ЛЭП) является ключевым требованием к защитам на линиях с пофазным управлением выключателями [1]. Оно актуально при отключении повреждения на неповрежденных фазах в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) и при неуспешном ОАПВ. Наиболее оптимальным с точки зрения таких требований является направленная высокочастотная защита (НВЧЗ) линии. Однако алгоритм ее функционирования вынуждает выводить эту защиту из действия в неполнофазных циклах ОАПВ [2]. Перевод НВЧЗ в цикле ОАПВ в режим дифференциально-фазной защиты (ДФЗ), как показано в [3], неэффективен из-за отказа дифференциально-фазного принципа [4] в действии при неуспешном ОАПВ практически на всех существующих линиях с пофазным управлением 220–750 кВ, равно как и применение ДФЗ в качестве защиты неповрежденных фаз. Для таких целей применяют бо-

лее простое решение с использованием токовой защиты неповрежденных фаз (ТЗНФ) [5]. Рассмотрим более подробно решение проблемы, которое позволяет увеличить быстродействие защиты линии при неуспешном ОАПВ.

ЗАЩИТЫ ЛЭП ПРИ НЕУСПЕШНОМ ОАПВ

Для решения задачи отключения линии при неуспешном ОАПВ могут применяться различные измерительные органы [6]. Их свод приведен в таблице 1.

Анализ защит и функций, представленных в таблице 1, показывает, что в качестве защиты линии при неуспешном ОАПВ наряду с традиционным применением фазного реле сопротивления, имеющим времена срабатывания более 80 мс, может быть применено комбинированное реле тока симметричных и аварийных составляющих (КРТСиАС). Применение фазного реле сопротивления и его недостатки, связанные с большими временами отключения неуспешного ОАПВ, уже не раз описаны в литературе [7, 8].

Табл. 1. РЗА для решения задачи отключения линии при неуспешном ОАПВ

№	Защита	Принцип действия	Применимость, комментарии
1	НВЧЗ	Реагирование на направление мощности обратной последовательности	Нет. Защита выводится из работы в цикле ОАПВ
2	ДФЗ	Определение направления аварийного тока по концам линии	Ограниченно. Принцип защиты отказывает при сложных видах повреждения [4]
3	ДЗ	Реагирует на междуфазную петлю повреждения	Нет. Возможно применение только фазного реле сопротивления
4	ТЗНФ	Реагирует на величину тока и направление мощности нулевой последовательности	Нет. Защита выводится из работы в цикле ОАПВ
5	Фазное РС АПВ	Реагирует на напряжение и ток поврежденной фазы	Да. Большие времена отключения [3]
6	КРТСиАС	Реагирует по схеме «И» на суммарные величины токов обратной и нулевой последовательности и их аварийные составляющие	Да. Реле пускается на время включения выключателя

Ключевые слова:

защиты с абсолютной селективностью, защиты линий в неполнофазных режимах, неуспешное ОАПВ, токовые защиты неполнофазного режима, адаптивные токовые защиты

АДАПТИВНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ЛЭП ПРИ НЕУСПЕШНОМ ОАПВ

Анализ режимов для построения алгоритма КРТСиАС приводит к выводу, что алгоритм работы комбинированного токового реле зависит только от текущих величин фазных токов, то есть по своей сути такое реле является адаптивным к текущему нагрузочному режиму, а перечень необходимых измерительных органов делает его структуру близкой к алгоритму действия ТЗНФ [5], которая включает два реле: комбинированное реле тока симметричных (КРТСС) и аварийных (КРТАС) составляющих. Первое реле, реагирующее на алгебраическую сумму токов обратной и нулевой последовательностей:

$$(I_2 + I_0)_{уст} = I_{2уст} + I_{0уст} = I_{уст}$$

$$\text{и } (\text{mod}(L_2) + \text{mod}(L_0)) \geq I_{уст} \quad (1)$$

необходимо для блокирования действия аварийных составляющих КРТАС при отключении присоединения, когда наблюдается резкое снижение токов симметричных составляющих I_2 и I_0 , например, при переходе в симметричный режим работы или при отключении линии [7].

Алгоритм КРТАС сравнивает сумму модулей аварийных составляющих обратной и нулевой последовательностей с уставкой:

$$(I_{2\text{ авар}} + I_{0\text{ авар}})_{уст} = I_{2\text{ авар уст}} + I_{0\text{ авар уст}} = I_{уст}$$

$$\text{и } (\text{mod}(L_{2\text{ авар}}) + \text{mod}(L_{0\text{ авар}})) \geq I_{уст} \quad (2)$$

где $I_{2\text{ авар}} = I_{2\text{ неполфазн}} - I_{2\text{ КЗ неуп. ОАПВ}}$ — аварийная составляющая обратной последовательности, определяемая как разность величин токов обратной последовательности в неполнофазном режиме цикла ОАПВ $I_{2\text{ неполфазн}}$ и в режиме неуспешного повторного включения $I_{2\text{ КЗ неуп. ОАПВ}}$; $I_{0\text{ авар}} = I_{0\text{ неполфазн}} - I_{0\text{ КЗ неуп. ОАПВ}}$ — аварийная составляющая нулевой последовательности, определяемая как разность величин токов нулевой последовательности в неполнофазном режиме цикла ОАПВ $I_{0\text{ неполфазн}}$ и в режиме неуспешного повторного включения $I_{0\text{ КЗ неуп. ОАПВ}}$.

На рисунке 1 показана логика выявления неуспешного ОАПВ и формирование команды на отключение линии на базе адаптивного комбинированного токового реле.

Рассмотрим расчет параметров срабатывания (уставок) модуля выявления неуспешного ОАПВ. Уставки элементов времени на возврат $T_{\text{неуп.ОАПВ}}$ и $T_{\text{авар}}$ зависят от времени включения и отключения выключателя и рассчитываются из условия обеспечения:

- надежного отключения при включении на устойчивое повреждение или повторного пробоя в месте повреждения по формуле:

$$T_{\text{неуп.ОАПВ}} = T_{\text{вкл}} + T_{\text{откл}} + \Delta T_{\text{зап}};$$

- формирования сигнала на отключение при неуспешном ОАПВ по формуле:

$$T_{\text{авар}} = T_{\text{откл}} + \Delta T_{\text{зап}},$$

где $T_{\text{вкл}}$ и $T_{\text{откл}}$ — соответственно время включения и отключения выключателя; $\Delta T_{\text{зап}} = 0,1$ сек — время запаса.

При неуспешном ОАПВ блок выявления неуспешного ОАПВ (на рисунке 1) формирует сигнал отключения линии по схеме «И» от токовых реле и дискретного сигнала блока ОАПВ.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Особый интерес представляет расчет параметров срабатывания токовых измерительных органов (ИО) [6]. Величина уставки суммарного тока $(\text{mod}(L_2) + \text{mod}(L_0)) \geq I_{уст}$ должна быть адаптивно отстроена от текущего режима. Рассмотрим случай расчета по максимальному рабочему току $I_2 + I_0 = f(I_{\text{раб макс}})$ в неполнофазном режиме цикла ОАПВ. Эта уставка суммарного тока будет максимальной и может быть использована как уставка в неадаптивных версиях защиты. Ее можно рассчитать следующим образом:

$$I_2 = (\underline{a}^2 I_B + \underline{a} I_C) / 3 = I_A / 3;$$

$$I_0 = (I_B + I_C) / 3 = I_A / 3;$$

$$I_2 + I_0 = I_2 + I_0 = 2I_{\text{фазн.раб}} / 3,$$

$$I_{уст} \geq 2k_{\text{отс}} I_{\text{раб макс}} / 3,$$

где I_B, I_C — токи неповрежденных фаз в цикле ОАПВ, I_A — виртуальный ток в третьей фазе; $I_{\text{раб макс}}$ — первичный максимальный рабочий ток в месте установки защиты (ток нагрузки), А; $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, который можно принять равным требуемому коэффициенту чувствительности $k_{\text{отс}} = k_{\text{ч.треб}} = 1,25$, а уставка КРТСС будет равна:

$$I_{уст} \geq 2k_{\text{отс}} I_{\text{раб макс}} / 3 \approx 0,8 I_{\text{раб макс}}.$$

Для расчета уставки КРТАС $(\text{mod}(L_{2\text{ авар}}) + \text{mod}(L_{0\text{ авар}})) \geq I_{уст}$ по максимальному рабочему току необходимо рассчитать модули токов обратной и нулевой последовательностей.

Составляющие уставки КРТАС по обратной $\text{mod}(L_{2\text{ авар}})$ и по нулевой $\text{mod}(L_{0\text{ авар}})$ последовательностям должны быть отстроены от небалансов, вызываемых погрешностью измерительных цепей фаз, и рассчитываются по выражениям:

$$\text{mod}(L_{2\text{ авар}}) \geq \frac{k_{\text{отс}}}{k_B} I_{2\text{нб}}, \quad (3)$$

$$\text{mod}(L_{0\text{ авар}}) \geq \frac{k_{\text{отс}}}{k_B} I_{0\text{нб}}, \quad (4)$$

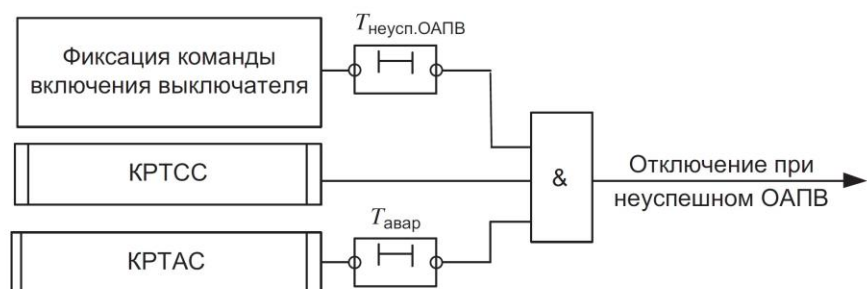


Рис. 1. Логика работы модуля выявления неуспешного ОАПВ

где $k_{отс} = 2,5$ — коэффициент отстройки; $k_b = 0,95$ — коэффициент возврата для микропроцессорных защит; $I_{2нб} = (0,02 \div 0,05) \cdot I_{раб макс}$ — первичный ток небаланса, вызываемый погрешностью измерительного тракта, начиная от трансформатора тока, А.

Уставка КРТАС по приращению вектора тока обратной и нулевой последовательностей ($\text{mod}(I_{2 авар}) + \text{mod}(I_{0 авар})$) $\geq I_{уст}$ принимается равной алгебраической сумме уставок по приращению обратной и нулевой последовательностей:

$$\begin{aligned} \text{mod}(I_{2 авар}) + \text{mod}(I_{0 авар}) &\geq \frac{k_{отс}}{k_b} (I_{2нб} + I_{0нб}) =, \\ &= \frac{k_{отс}}{k_b} \cdot 2 \cdot (0,02 \div 0,05) \cdot I_{раб макс}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для случая максимальной погрешности измерительного трансформатора тока формулу (5) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{mod}(I_{2 авар}) + \text{mod}(I_{0 авар}) &\geq \frac{2,5}{0,95} \cdot 2 \cdot 0,05 \cdot I_{раб макс} \approx \\ &\approx 0,3 I_{раб макс}, \end{aligned} \quad (5a)$$

Коэффициент чувствительности выбирается как для защит с абсолютной селективностью по выражению:

$$k_{ч} \geq \frac{\text{mod}(\Delta I_{2 мин}) + \text{mod}(\Delta I_{0 мин})}{\text{mod}(I_{2 авар}) + \text{mod}(I_{0 авар})} =$$

$$= \frac{\text{mod}(\Delta I_{2 мин}) + \text{mod}(\Delta I_{0 мин})}{0,3 I_{раб макс}} \geq 2,0, \quad (6)$$

где $\text{mod}(\Delta I_{2 мин})$ и $\text{mod}(\Delta I_{0 мин})$ — значения приращений векторов первичного тока обратной и нулевой последовательностей при однофазном КЗ во включенной с одной стороны отключавшейся фазе в конце линии в минимальном режиме.

Таким образом, уставки срабатывания КРТАС зависят только от токов фаз линии и могут быть адаптированы к текущему режиму как интегральное значение за 1–3 периода.

ВЫВОДЫ

1. В качестве быстродействующей защиты линии при неуспешном ОАПВ рекомендована адаптивная токовая защита на базе комбинации симметричных и аварийных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей.
2. Адаптивная токовая защита не требует предварительного расчета параметров срабатывания. Они адаптивно формируются по величинам токов текущего наблюдаемого режима.
3. Чувствительность адаптивной токовой защиты будет всегда максимальной. Ее выбирают по текущему режиму, который, как правило, меньше расчетного максимального. **✶**

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. 223 с.
2. Левиуш А.И., Дони Н.А., Надель Л.А., Наумов А.М. Высокочастотная направленная и дифференциально-фазная защита ПДЭ 2003 для ВЛ 500–750 кВ. М.: ЭНАС, 1996. 204 с.
3. Ефремов В.А., Ефремов А.В. НВЧЗ для линий с ОАПВ // ЭЛЕКТРОЭNERГИЯ. Передача и распределение, 2018, № 5(50). С. 76–78.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М.: Госэнергоиздат, 1957. 344 с.
5. Ефремов В.А., Романов Ю.В., Воронов П.И. Токовая защита неповрежденных фаз в цикле ОАПВ // ЭЛЕКТРОЭNERГИЯ. Передача и распределение, 2013, № 3(18). С. 98–100.
6. Ефремов В.А., Ефремов А.В. НВЧЗ на линиях с пофазным управлением. Эффективность защиты // Сборник докладов науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 75–82.
7. Ефремов В.А. Защиты абсолютной селективности серии «Бреслер». Часть 2. Основная защита линий с ОАПВ // Энерго-info, 2008, № 9. С. 70–74.
8. Ефремов В.А. ОАПВ: Опыт разработки и применения // Релейная защита и автоматизация, 2014, № 03(16). С. 10–13.

REFERENCES

1. Company Standard STO 56947007-29.120.70.241-2017. Technical requirements to microprocessor-based relay protection and automation devices. Company standard of FGC UES, PJSC. Moscow, FGC UES, PJSC Publ., 2017. 223 p. (In Russian)
2. Leviush A.I., Doni N.A., Nadel L.A., Naumov A.M. Directional carrier and differential-phase protection PDE 2003 for 500–750 kV lines. Moscow, ENAS Publ., 1996. 204 p. (In Russian)
3. Efremov V.A., Efremov A.V. Directional carrier protection for lines with single-phase autoreclosing // *ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredeleniye* [ELECTRIC POWER. Transmission and Distribution], 2018, no. 5(50), pp.76–78. (In Russian)
4. Atabekov G.I. Theoretical basics of HV network relay protection. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1957. 344 p. (In Russian)
5. Efremov V.A., Romanov Yu.V., Voronov P.I. Current protection of healthy phases in a single-phase autoreclosing cycle // *ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredeleniye* [ELECTRIC POWER. Transmission and Distribution], 2013, no. 3(18), pp. 98–100. (In Russian)
6. Efremov V.A., Efremov A.V. Directional carrier protection for lines with individual phase control. Protection efficiency // *Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Book of reports of scientific-and-technical conference], Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2019, pp.75–82. (In Russian)
7. Efremov V.A. Protections with absolute selectivity of “Bresler” series. Part 2. Main protection of lines with single-phase autoreclosing // *Energo-info*, 2008, no.9, pp.70–74. (In Russian)
8. Efremov V.A. Single-phase autoreclosing: Experience of development and application // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2014, no. 03(16), pp.10–13. (In Russian)