

ния; система управления должна исключать работу в области резонанса. Описывается еще вариант УПК на основе СТАТКОМ (УПК-С) [5, 9]. Разработаны внешние характеристики ЛЭП с УПК-С [9]. Однако, к сожалению, в отмеченных работах ЛЭП рассматриваются без конечных устройств и не учитывается  $k_s$  – коэффициент продольной компенсации. Поэтому оценка эффективности продольной емкостной компенсации получается не полной. Соответственно становится понятным критическое замечание [8] о неэффективности продольной емкостной компенсации. При этом приводится в качестве примера линия длиной 1028 км в Бразилии со степенью компенсации 66 %. К сожалению, при разработке проекта этой системы передачи не были, по-видимому, учтены основополагающие работы по теории компенсации параметров систем передачи [1–3, 6, 7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В е н и к о в, В. А. Управляемые электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности / В. А. Веников, Ю. Н. Астахов, В. М. Постолатий // *Электричество*. – 1969. – № 12.
2. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967.
3. В о л ь ф, А. А. Проблемы передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям / А. А. Вольф. – М.: Госэнергоиздат, 1941.
4. К о щ е е в, Л. А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети / Л. А. Кошеев, В. А. Шлайфштейн // *Электрические станции*. – 2005. – № 12.
5. И в а к и н, В. Н. Исследование характеристик управляемой продольной компенсации как устройства для регулирования потоков мощности гибких линий электропередачи переменного тока / В. Н. Ивакин // *Электротехника*. – 2003. – № 6.
6. А л е к с а н д р о в, Г. Н. Статический тиристорный компенсатор на основе управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа / Г. Н. Александров // *Электричество*. – 2001. – № 2.
7. С о р о к и н, В. М. Управляемая компенсация дальних линий электропередачи / В. М. Сорокин, Л. И. Дорожко // *Известия РАН. Энергетика*. – 2005. – № 3.
8. А л е к с а н д р о в, Г. Н. Об эффективности применения компенсирующих устройств на линиях электропередачи / Г. Н. Александров // *Электричество*. – 2005. – № 4.
9. И в а к и н, В. Н. Внешние характеристики устройств гибких передач переменного тока и их влияние на характеристики мощности управляемых линий электропередачи переменного тока / В. Н. Ивакин // *Электричество*. – 2005. – № 12.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 30.03.2007

УДК 621.316.925

### ПРИНЦИП ВЫПОЛНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ

Докт. техн. наук, проф. РОМАНЮК Ф. А., канд. техн. наук, доц. ТИШЕЧКИН А. А.,  
инж. ГУРЬЯНЧИК О. А.

*Белорусский национальный технический университет*

В данной статье рассматривается один из принципов выполнения адаптивной микропроцессорной токовой направленной защиты линии от междоузельных коротких замыканий. На сегодняшний день устройства токовой

направленной защиты от междуфазных коротких замыканий выполняются обычно с независимой характеристикой выдержки времени [1, 2] и содержат измерительные органы тока (ИОТ), включаемые на полные токи фаз защищаемого объекта, и направления мощности, включаемые на полные токи фаз и междуфазные напряжения обычно по так называемой 90-градусной схеме [3].

Для ускорения отключения КЗ в общем случае применяются три ступени: первая ступень – токовая отсечка без выдержки времени (ТО); вторая ступень – токовая отсечка с относительно небольшой выдержкой времени (ТОВ); третья ступень – максимальная токовая направленная защита (МТЗ) со значительной выдержкой времени.

В таких устройствах междуфазные КЗ в начале линии отключаются ТО без выдержки времени. ТО рекомендуется к применению, если она защищает не менее 18–20 % длины линии. Остальная часть линии защищается ТОВ. Третья ступень является резервной к первым двум. КЗ по всей длине линии отключаются этой ступенью с большими выдержками времени, особенно на головных участках сети. Такие защиты имеют значительное число ИОТ и ограниченную защитоспособность главным образом первой ступени (ТО).

Защитоспособность определяется длиной линии, защищаемой каждой ступенью. Длина линии, защищаемая ТО, определяется графически по кривым спада тока КЗ по длине линии  $I_{КЗ} = f(l)$ , построенным для максимального и минимального режимов работы, и току срабатывания защиты.

Ток срабатывания ТО выбирается по условию отстройки от максимального значения тока трехфазного КЗ  $I_{КЗ\max}^{(3)}$  в конце защищаемой линии по формуле

$$I_{СЗ}^I = k_{отс} I_{КЗ\max}^{(3)}, \quad (1)$$

где  $I_{КЗ\max}^{(3)}$  – наибольший ток трехфазного КЗ в конце защищаемого участка.

Длина линии, защищаемая ТО, определяется в минимальных режимах работы, когда сопротивления источников питания, трансформаторов, значительно увеличиваются. Например, сопротивления трансформаторов с РПН на разных положениях регулятора могут изменяться в 2–2,5 раза, что приводит к резкому изменению тока КЗ. В результате ТО не защищает начало линии (или защищает ее небольшую часть) и не может быть применена.

Ток срабатывания ТОВ выбирается по условию согласования с током срабатывания ТО последующей линии

$$I_{СЗ}^{II} = k_n I_{СЗ}^I. \quad (2)$$

Выдержка времени ТОВ выбирается на ступень селективности больше времени срабатывания ТО последующей линии.

Ток срабатывания  $I_{СЗ}^{III}$  третьей ступени (МТЗ) выбирается по условию отстройки от максимальных нагрузочных токов с учетом перегрузок и самозапуска электродвигателей нагрузки, а также ряда других факторов.

Выдержка времени МТЗ выбирается по условию согласования с выдержками времени защит сети и может быть значительной, особенно на головных участках сети.

Предлагаемый способ принципа адаптивности микропроцессорной токовой направленной защиты линии основывается на определении расстояния до точки короткого замыкания и сравнении полученной величины с длиной защищаемого участка. Если при сравнении оказывается, что повреждение находится в защищаемой зоне, то отключение поврежденного участка осуществляется без выдержки времени. Это позволяет повысить защитоспособность при сохранении высокого быстродействия.

Определение расстояния до точки короткого замыкания осуществляется в блоке определения расстояния до точки КЗ, которое рассчитывается по следующему выражению:

$$l_{\text{КЗ}} = \frac{U}{r_{\text{уд}} i + L_{\text{уд}} i'} \quad (3)$$

где  $U$ ,  $i$ ,  $i'$  – соответственно междуфазное напряжение контура КЗ, разность фазных токов этого контура и первая производная этого тока;  $r_{\text{уд}}$ ,  $L_{\text{уд}}$  – удельные активное сопротивление и индуктивность защищаемой линии.

В пороговом элементе производится сравнение  $l_{\text{КЗ}}$  с длиной линии  $l_{\text{л}}$ . Если КЗ находится в пределах защищаемой линии  $l_{\text{КЗ}} < l_{\text{л}}$ , то его можно отключить без выдержки времени. Если повреждение расположено за пределами защищаемой линии  $l_{\text{КЗ}} > l_{\text{л}}$ , то его следует отключать с выдержкой времени третьей ступени (МТЗ), выбранной по условию согласования выдержек времени защит сети.

Расстояние до точки КЗ может быть определено достаточно точно за счет исключения влияния изменений сопротивления питающих систем, силовых трансформаторов и таким образом КЗ на значительной части длины линии (приблизительно 70–90 %  $l_{\text{л}}$  в зависимости от точности определения  $l_{\text{КЗ}}$ ) могут быть отключены без выдержки времени.

Из-за погрешностей в определении  $l_{\text{КЗ}}$  для обеспечения селективной работы устройства в пороговом элементе сравнение  $l_{\text{КЗ}}$  нужно производить не с фактической длиной линии  $l_{\text{л}}$ , а с увеличенной длиной  $k_{\text{н}} l_{\text{л}}$ . Величина этого коэффициента зависит от точности определения  $l_{\text{КЗ}}$  и может быть снижена путем учета всех или части влияющих факторов. Такими факторами являются: погрешности измерительных трансформаторов, погрешности расчета, наличие переходных сопротивлений в месте повреждения, точность задания удельных параметров линии  $r_{\text{уд}}$ ,  $L_{\text{уд}}$  и т. д.

При необходимости расчет  $l_{\text{КЗ}}$  может выполняться не по формуле (3), а по более сложным формулам, позволяющим повысить точность расчета.

На рис. 1 приведена функциональная схема адаптивной микропроцессорной токовой направленной защиты линии.

Устройство содержит блоки определения расстояния до места повреждения (блоки 1, 2, 3), измерительные органы мощности (ИОМ) (блоки 4, 5, 6), измерительные органы тока (ИОТ) (блоки 7, 8, 9). ИОТ и ИОМ подключены к измерительным трансформаторам тока на фазные токи  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ , а блоки определения расстояния до места повреждения – на разность фаз-

ных токов  $(i_a - i_b)$ ,  $(i_b - i_c)$ ,  $(i_c - i_a)$ . К измерительным трансформаторам напряжения на междуфазные напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  подключены ИОМ и блоки определения расстояния до места повреждения. Выходы блоков определения расстояния до места повреждения  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  подключены к входам пороговых элементов ПЭ (блоки 10, 11, 12), выходы которых вместе с выходами измерительных органов мощности ИОМ через логические элементы И2 (блоки 13, 14, 15) и логический элемент ИЛИ2 (блок 16), орган сигнализации ОС2 (блок 17) связаны с исполнительным элементом ИЭ (блок 18). Выходы ИОТ и ИОМ каждой фазы через логические элементы И1 (блоки 19, 20, 21) и логический элемент ИЛИ1 (блок 22), орган выдержки времени ДТ (блок 23), орган сигнализации (ОС1) (блок 24) связаны с исполнительным элементом ИЭ, отключающим выключатель защищаемого объекта.

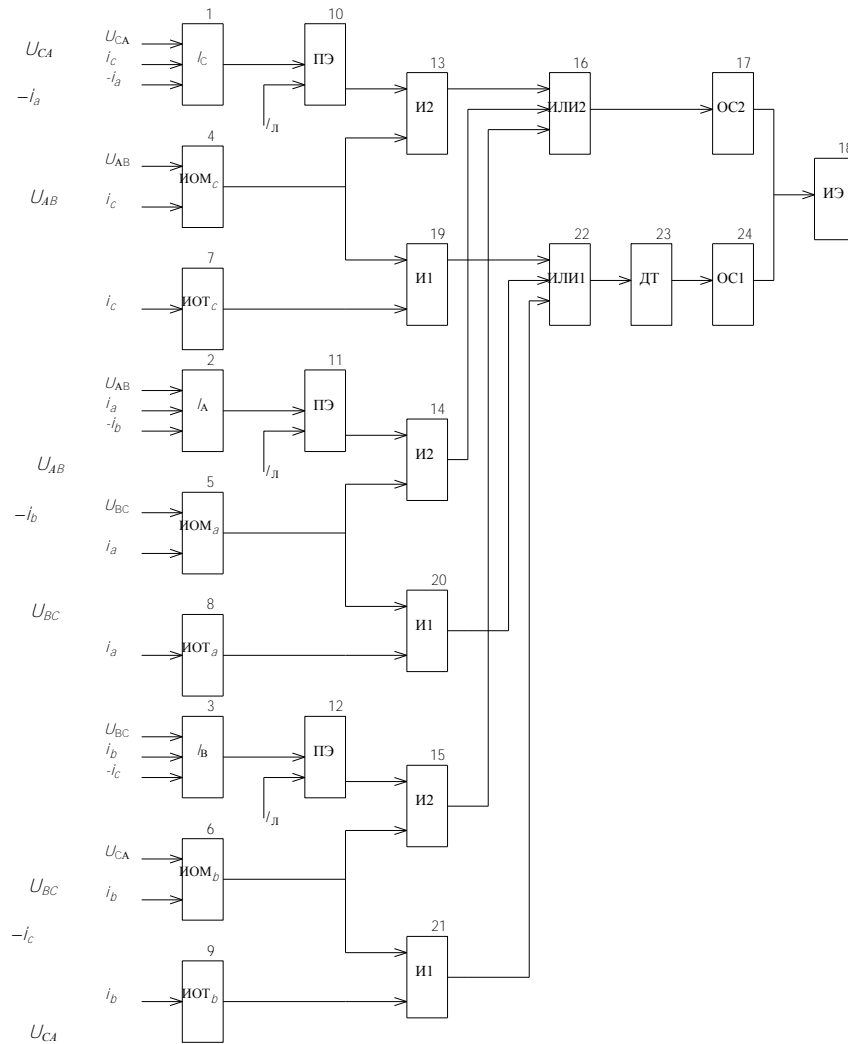


Рис. 1. Функциональная схема адаптивной микропроцессорной токовой направленной защиты линии

Блоки определения расстояния  $I_{K3}$  от места установки защиты до точки КЗ позволяют определить расстояние до точки КЗ в соответствии с формулой (3).

Органы направления мощности с двумя подведенными величинами, включаемые по любой известной схеме, определяют направление мощности в каждой фазе. При КЗ на защищаемой и последующих линиях на выходе этих органов появляется сигнал. При обратном направлении мощности (КЗ «за спиной» защиты) сигнал на выходе этих органов отсутствует.

Органы максимального тока ИОТ с одной сравниваемой величиной измеряют значение полного тока фазы и сравнивают данное значение с уставкой МТЗ, выбираемой по условию отстройки от максимальных нагрузочных токов с учетом перегрузок и самозапуска электродвигателей нагрузки, а также ряда других факторов.

Орган выдержки времени ДТ служит для задания уставок по времени срабатывания МТЗ, выбираемого по условию селективности с защитами смежных линий по известной методике.

Органы сигнализации ОС1, ОС2 служат для фиксации срабатывания защиты без выдержки времени или с выдержкой времени.

Исполнительный элемент ИЭ представляет собой усилительное звено и реализует сигналы защиты.

Органы и элементы схемы могут быть выполнены по всем известным схемам на базе средств аналоговой или цифровой техники. Целесообразно для реализации устройства использовать серийно выпускаемые промышленностью микроконтроллеры (микропроцессорные системы).

Устройство работает следующим образом. Токи фаз  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  от измерительных трансформаторов тока защищаемой линии поступают на входы ИОТ измерительных органов 4, 5, 6, 7, 8, 9, а на входы блоков 1, 2, 3 подаются разности фазных токов  $(i_a - i_b)$ ;  $(i_b - i_c)$ ;  $(i_c - i_a)$ . От измерительных трансформаторов напряжения на входы блоков 1, 2, 3, 4, 5, 6 подводятся междуфазные напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ .

В нормальном режиме, при перегрузках или самозапуске электродвигателей в зависимости от направления мощности в фазах защищаемой линии на выходах блоков 4, 5, 6 могут существовать сигналы, а сигналы на выходах блоков 7, 8, 9 каждой фазы отсутствуют, так как токи в фазах линии меньше токов срабатывания  $I_{C3}^{III}$ . На выходах пороговых элементов 10, 11, 12 сигналы также отсутствуют, поскольку при отсутствии повреждения расстояния  $l_{КЗ}$ , определяемые в блоках 1, 2, 3, больше длины защищаемой линии  $l_n$ . Сигналы на выходах логических элементов 13, 14, 15, 19, 20, 21, 16, 22 и исполнительного элемента 18 отсутствуют.

При междуфазных КЗ на защищаемой линии срабатывают ИОМ 4, 5, 6. При увеличении токов, превышающих значения  $I_{C3}^{III}$ , срабатывают ИОТ 7, 8, 9, и сигналы через логические элементы 19, 20, 21, 22 поступают на орган выдержки времени 23. Если расстояние до точки КЗ, рассчитываемое в блоках 1, 2, 3:  $l_{КЗ} < k_n l_n$ , то в зависимости от вида междуфазного КЗ на выходах одного или всех пороговых элементов 10, 11, 12 появляются сигналы, которые через логические элементы 13, 14, 15, 16, орган сигнализации 17 поступают на исполнительный элемент 18. Выключатель поврежденной линии отключается без выдержки времени. При КЗ в конце защищаемой линии или за ее пределами, когда  $l_{КЗ} > k_n l_n$ , сигналы на выходах пороговых

элементов 10, 11, 12 отсутствуют, но есть сигнал на входе органа выдержки времени 23. По истечении заданной выдержки времени, выбираемой по условию селективности с защитами смежных линий, на выходе органа 23 появляется сигнал, который через орган сигнализации 24 поступает на исполнительный элемент 18. Выключатель линии отключается с выдержкой времени.

При КЗ «за спиной» защиты (при обратном направлении мощности КЗ) на выходах одного или всех ИОТ и пороговых элементов ПЭ могут появляться сигналы. Однако сигнал на исполнительный элемент ИЭ не поступает, так как сигналы на выходах всех ИОМ отсутствуют.

## ВЫВОД

Предложенный принцип выполнения токовой направленной защиты линии благодаря введению принципа адаптивности позволяет уменьшить число измерительных органов тока, повысить защитоспособность и увеличить быстродействие.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем / А. М. Федосеев. – М.: Энергия, 1976. – С. 154–159.
2. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей / Я. С. Гельфанд. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 232–234.
3. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – С. 223–231.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 5.05.2007

УДК 621.3.061

## О СОБСТВЕННЫХ ЧИСЛАХ МАТРИЦЫ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Докт. техн. наук САФАРЯН В. С.

*ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики» (Республика Армения)*

Уравнение состояния цепей с сосредоточенными параметрами представляется в виде

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{W}(t), \quad (1)$$

где для линейных и постоянных во времени цепей:  $\mathbf{A}$  – квадратная матрица с постоянными элементами;  $\mathbf{W}$  – вектор входного сигнала;  $\mathbf{X}$  – вектор состояния цепи, компонентами которого являются напряжения на емкостях и токи в индуктивностях [1].