



PS1 – S3-08



Обеспечение функций дальнего резервирования релейной защиты трансформаторов в условиях продольно-поперечной несимметрии

И.В. НАГАЙ

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт)

Россия

nagayiv@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Режимы множественной продольно-поперечной несимметрии, неполнофазный режим, информационные признаки, распознавание повреждений, резервные защиты.

1 ВВЕДЕНИЕ

Актуальность обсуждаемой проблемы. Режимы множественной продольно-поперечной несимметрии, сопровождаемые разрывом фазных проводов воздушных линий (ВЛ) и одновременным коротким замыканием (КЗ) в сети с эффективно-заземленной нейтралью или замыканием на землю в сети с изолированной или резистивно-заземленной нейтралью, в сетях с компенсацией емкостных токов, как правило, не сопровождаются возрастанием токов до уровней сопоставимых с токами КЗ в электрических распределительных сетях напряжением 6-110 кВ.

Необходимо отметить, что большинстве случаев релейные защиты (РЗ) дальнего резервирования ВЛ с ответвленными или проходными подстанциями, а в отдельных случаях и защиты ближнего резервирования не обладают достаточной чувствительностью к рассматриваемым режимам [1-3]. Подобные повреждения приводят не только к потерям энергии в электрических распределительных сетях, но и вызывают повреждения силовых трансформаторов из-за длительного протекания токов, превышающих их номинальные токи в 2-4 раза [1-5], электродвигателей, перенапряжения в незаземленных нейтральных силовых трансформаторов, повреждения измерительных трансформаторов напряжения, возможное излишнее действие РЗ на смежной параллельной линии [1-3]. Неполнофазный режим с разрывом фазы, в которой установлен короткозамыкатель и КЗ со стороны питаемой подстанции (трансформатора) является одним из тяжелых режимов с точки зрения обеспечения надежного отключения повреждения со стороны питающей подстанции, т.к. его включение под воздействием защиты трансформатора приводит к повышению тока не более 5-10%. Что явно недостаточно для срабатывания защиты со стороны источника питания [1-5].

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Обзор существующих решений. В настоящее время в распределительных электрических сетях 6-110 кВ отсутствует специальная защита от данных видов повреждения [1-3]. В сетях с эффективно-заземленной нейтралью, являющихся объектом настоящего рассмотрения, основной защитой от данных видов повреждения является токовая (направленная) защита нулевой последовательности (ТЗНП), чувствительность которой, как правило, недостаточна. Ряд технических решений [1,6,7], имеющие более высокое техническое совершенство по

сравнению с ТЗНП, позволяют решить проблему построения защиты от ППН, но, к сожалению, не получили широкого применения в рассматриваемых электрических сетях.

Определение области существования режимов ППН. Рассматриваемый подход в построении защиты от ППН показан на примере сети с радиальной ВЛ (рис.1), питающей ответвительные подстанции, с параметрами: $Z_{G1} = 32e^{j85^\circ}$ Ом – сопротивление системы G1; $Z_{Л1} = 5,5e^{j55^\circ}$, $Z_{Л2} = 8e^{j55^\circ}$ Ом – сопротивления первого и второго участков магистральной ВЛ; $Z_{Т1} = 225e^{j88^\circ}$ Ом и $Z_{Т2}$, принимающее значение от $556e^{j88^\circ}$ Ом до $87e^{j88^\circ}$ Ом – сопротивления трансформаторов ответвительных подстанций Т1 (мощность трансформатора составляла 10 МВА), Т2. Мощность трансформатора Т2 варьировалась от 2,5 до 16 МВА, а мощность нагрузки трансформаторов Т1, Т2 изменялась в диапазоне (10÷100)% от их номинальной мощности, аргумент тока нагрузки $\varphi_{нг} = -(20 \div 40)^\circ$, сопротивления ответвлений на порядок меньше сопротивлений магистральных участков ВЛ, и тем более трансформаторов, и поэтому в расчетах не учитывались. Переходное сопротивление в месте повреждения изменялось в диапазоне (0-20)% от сопротивления трансформатора.

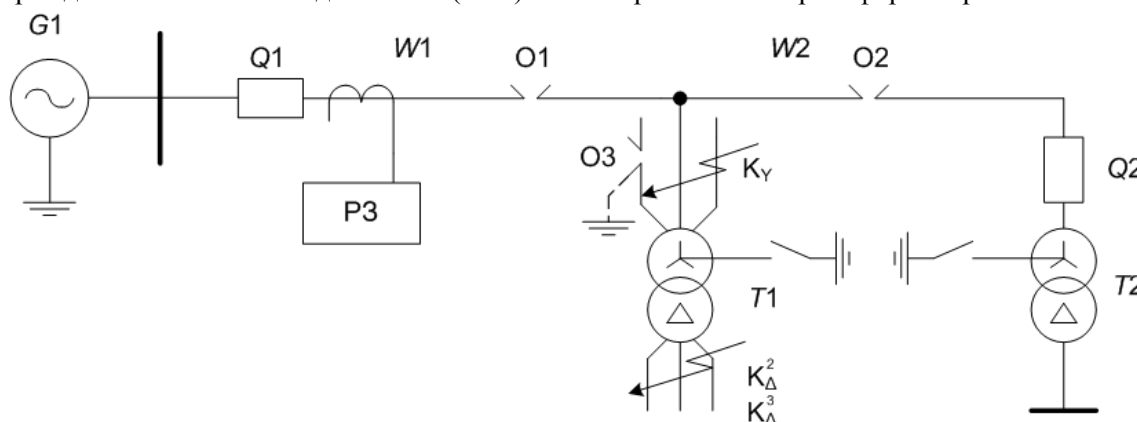


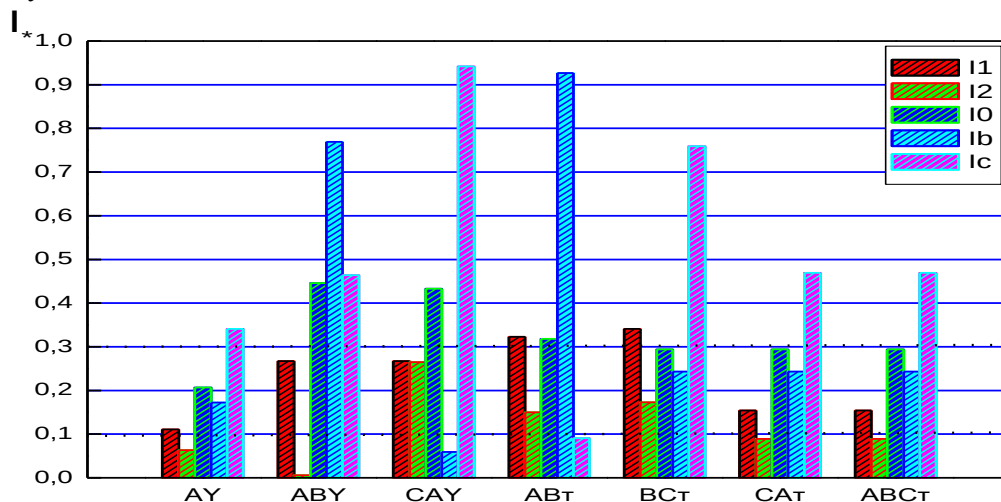
Рис. 1: Поясняющая схема сети 110 кВ с ответвительными подстанциями

Наихудшими с позиции чувствительности резервных защит являются следующие виды множественной продольно-поперечной несимметрии (табл.1): обрыв (O1 – O3) и короткое замыкание на землю фазы (K_Y) А первого и второго участков ВЛ W1 и W2 с КЗ со стороны трансформатора Т1 (режим АУ), обрыв фазы А и КЗ фаз АВ (режим АВУ), СА (режим САУ), обрыв фазы А и короткое замыкание (двухфазное и трехфазное) на стороне низшего напряжения (K_Δ) трансформатора Т1 с группой соединения обмоток «звезда-треугольник» фаз АВ (режим АВΔ), ВС (режим ВСΔ), СА (режим САΔ), АВС (режим АВСΔ).

Вид повреждения						Контролируемые токи
Разрыв фазы А	O1	O2	O3	K_Y	K_Δ	$I_{AY}, I_{BY}, I_{CY}, I_1, I_2, I_0$
	+	–	–	–	–	$I_{AY}=0, 0,1I_{K3} < I_0 < 0,3I_{K3}$
	–	+	–	–	–	$I_{AY} < I_{BY}, I_{AY} < I_{CY}, 0,1I_{K3} < I_0 < 0,3I_{K3}$
	–	–	+	–	–	$I_{AY} < I_{BY}, I_{AY} < I_{CY}$
	–	–	+	K_{AY}	–	$I_{AY} < I_{BY}, I_{CY} > I_{BY}, 0,1I_{K3} < I_0 < 0,3I_{K3}$
	–	–	+	K_{ABY}	–	$I_{AY} < I_{CY}, I_{BY} > I_{CY}, I_0 > 0,3I_{K3}$
	–	–	+	K_{ACY}	–	$I_{AY} < I_{CY}, I_{BY} < I_{CY}, I_0 > 0,3I_{K3}$
	–	–	+	–	$K_{AB\Delta}$	$I_{AY} < I_{BY}, I_{BY} > I_{CY}, 0,1I_{K3} < I_0 < 0,3I_{K3}$
	–	–	+	–	$K_{BC\Delta}$	$I_{AY} < I_{CY}, I_{BY} < I_{CY}, 0,1I_{K3} < I_0 < 0,3I_{K3}$
	–	–	+	–	$K_{CA\Delta}$	$I_{AY} < I_{CY}, I_{BY} < I_{CY}, 0,1I_{K3} < I_0 < 0,3I_{K3}, I_2 < 0,1I_{K3}$
	–	–	+	–	$K_{ABCS\Delta}$	$I_{AY} < I_{CY}, I_{BY} < I_{CY}, 0,1I_{K3} < I_0 < 0,3I_{K3}, I_2 < 0,1I_{K3}$

Табл. 1: Режимы множественной ППН и соотношение контролируемых токов

Первые три вида сложных повреждений являются развитием одного простого повреждения: падение оборвавшегося провода на землю, схлестывание (или пробой воздушной изоляции) оборвавшегося фазного провода с другим фазным проводом. Последние четыре режима могут возникать при работе ВЛ в неполнофазном режиме, что практикуется в некоторых энергосистемах, недовключении одного из полюсов коммутационного аппарата питающей, ответвительной или проходной подстанций, обрыве фазного провода, например шлейфа на анкерной опоре и т.д. Короткие замыкания фаз *B* и *C* с одновременным разрывом фазы *A*, а также междуфазное КЗ исключены из этого списка ввиду значительных уровней токов и чувствительности РЗ питающей подстанции.



Вид короткого замыкания при обрыве фазы *A* на стороне ВН

Рис. 2: Соотношение фазных токов и токов симметричных составляющих в различных режимах множественной ППН

Расчетным режимом для оценки чувствительности резервной защиты трансформатора ответвительной подстанции является режим обрыва одной фазы и ее же короткое замыкание на землю со стороны питаемого трансформатора. Расчетные выражения для данного режима [5] с их упрощением для $\underline{Z}_{1L} = \underline{Z}_{2L}$ приведены ниже. Токи соответствующих последовательностей слева от разрыва, в месте КЗ и справа от него соответственно $I_{\alpha y}$, $I_{\alpha k}$, $I_{\alpha L}$ могут быть определены ($\alpha = 1, 2, 0$ – номер симметричной составляющей, а именно прямой, обратной и нулевой последовательности):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1k} &= \dot{E}_c \left(\frac{\underline{Z}_{1L} - \beta_j \underline{Z}_{2L}}{\underline{Z}_2 \underline{W}_j} + \frac{\underline{Z}_{1L} - \rho_j \underline{Z}_{0L}}{\underline{Z}_0 \underline{W}_j} \right); \\ \dot{I}_{A1y} &= \dot{E}_c \left[\left(\frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_0} \right) \frac{\underline{Z}_A}{\underline{W}_j} - \frac{\underline{P}_j}{\underline{Z}_2 \underline{Z}_0 \underline{W}_j} \right]; \\ \dot{I}_{A2y} &= \frac{(\rho_j \underline{Z}_{2L} - \beta_j \underline{Z}_{0L}) \dot{I}_{A1k} - \underline{Z}_0 \dot{I}_{A1y}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}, \quad \dot{I}_{A1k} = \dot{I}_{A2k}; \quad \dot{I}_{A2k} = \dot{I}_{A0k}, \end{aligned}$$

где $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{1F} + \underline{Z}_{1L}$; $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{2F} + \underline{Z}_{2L}$; $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{0F} + \underline{Z}_{0L}$; j – номер фазы *A*, *B*, *C* соответственно и $\beta_1 = \rho_1 = 1$, $\beta_2 = a^2 = e^{j240^\circ}$, $\rho_2 = a = e^{j120^\circ}$, $\beta_3 = \rho_2$, $\rho_3 = \beta_2$; $\underline{Z}_{\alpha F} = \underline{Z}_{\alpha c} + \underline{Z}_{\alpha DM} + \underline{Z}_{\alpha Nk}$, $\underline{Z}_{\alpha L} = \underline{Z}_{\alpha KR} + \underline{Z}_{\alpha t1} + \underline{Z}_{\alpha H}$, $\underline{Z}_{\alpha c}$ – сопротивление системы; $\underline{Z}_{\alpha DM}$, $\underline{Z}_{\alpha Nk}$ – сопротивления участков ВЛ слева и справа (до места КЗ) от места разрыва; $\underline{Z}_{\alpha KR}$ – сопротивление участка ВЛ от места КЗ до шин питаемой подстанции; $\underline{Z}_{\alpha t1}$, $\underline{Z}_{\alpha H}$ – сопротивления трансформатора *T* 1 и его нагрузки.

$$\underline{W}_1 = \underline{Q} \underline{Z}_A - \left[\frac{(\underline{Z}_{1L} - \underline{Z}_{0L})^2}{\underline{Z}_0} + \frac{(\underline{Z}_{2L} - \underline{Z}_{0L})^2 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2 \underline{Z}_0} \right]; \quad \underline{Q} = 2 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0}; \quad \underline{P}_1 = (\underline{Z}_{2L} - \underline{Z}_{0L})^2;$$

$$\underline{W}_2 = \underline{W}_3 = \underline{Q} \underline{Z}_A - \left[\frac{3\underline{Z}_{1L}}{\underline{Z}_0} + \frac{\underline{Z}_{1L}^2 + \underline{Z}_{1L} \underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0L}^2}{\underline{Z}_0} + \frac{(\underline{Z}_{2L}^2 + \underline{Z}_{2L} \underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0L}^2) \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2 \underline{Z}_0} \right];$$

$$P_2 = P_3 = Z_{2L}^2 + Z_{2L} Z_{0L} + Z_{0L}^2; \quad \underline{Z}_A^{(1)} = \underline{Z}_{1L} + \underline{Z}_{2L} + \underline{Z}_{0L} + 3R_n, \quad R_n - \text{переходное сопротивление.}$$

Возникновение несимметричного повреждения в сети вызывает появление симметричных составляющих и изменение фазных токов, их аргументов, что получило отражение на рис.2 (мощность трансформатора $T2$ равна мощности трансформатора $T1$, нейтраль трансформатора $T2$ разземлена). При этом за базовый ток принят ток трехфазного КЗ I_{K3} на стороне низшего напряжения трансформатора $T1$. При этом ток трехфазного КЗ за данным трансформатором примерно в 10 раз превышает номинальный ток (напряжение короткого замыкания трансформатора равно $U_{*K} = 0,105$). Фазные токи во всех случаях превышают номинальный ток защищаемого трансформатора, что еще раз подчеркивает недопустимость его длительной работы в режиме ППН не только при наличии повреждения на стороне низшего напряжения, но и при ППН в сети высшего напряжения.

Решение задачи исследования. В качестве пусковых органов для предлагаемой защиты могут использоваться органы тока симметричных составляющих: обратной и нулевой последовательностей с током срабатывания $I_{*cp} \geq k_3 k_{отс} I_{*ном}$, если же его значение $I_{*cp} \leq (0,05 \div 0,1) I_{*сум}$, где $I_{*сум}$ – максимальный ток нагрузки питающей линии, то возможно использование измерительных органов приращения токов симметричных составляющих или фазных токов. Эффективным средством может быть использование измерительных органов относительного замера (рис.3,а) токов симметричных составляющих ($I1/I0$ и $I2/I0$) и суммы и разности модулей фазных токов ($(I_B + I_C)/(I_B - I_C)$), где I_B, I_C – токи двух фаз с наибольшими величинами (при обрыве фазы A данными фазами являются фазы B и C ; за базовый ток в данном случае принят номинальный ток трансформатора. Данный вариант относительного замера подобен используемому в [9], но имеет свои отличия по определению областей аварийных режимов. При этом среднеквадратичное расстояние между областями токов симметричных составляющих и фазных токов превышает значение номинального тока защищаемого трансформатора, что позволяет обеспечить распознавание режимов множественной ППН и простых коротких замыканий. Задачей построения пусковых измерительных органов относительного замера является максимальное удаление областей 1 и 2 при одновременном уменьшении их площадей. Это может быть достигнуто за счет коррекции входных сигналов, как это показано на рис.3,б.

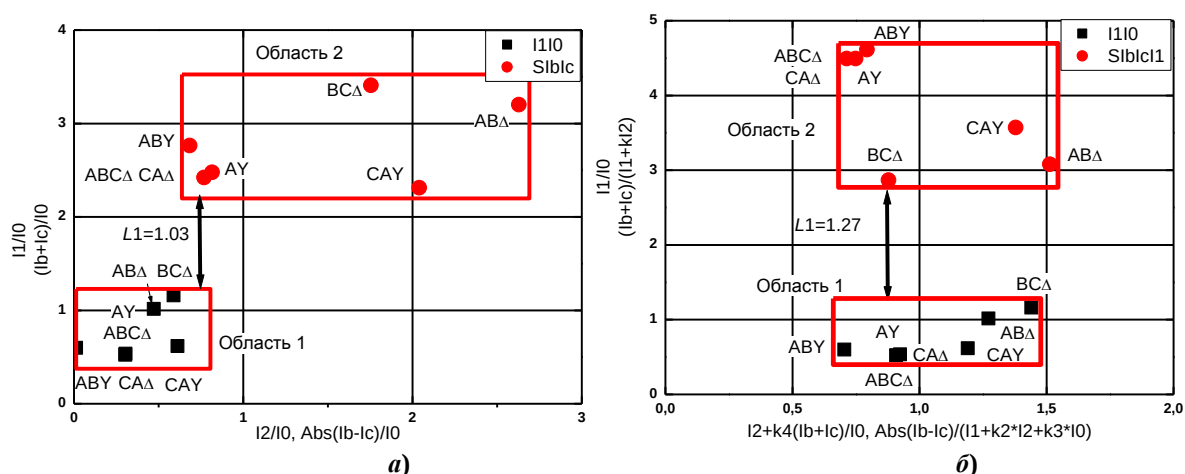


Рис. 3: Области режимов множественной ППН для пусковых органов относительного замера токов симметричных составляющих и суммы и разности модулей фазных токов: а – без коррекции входных сигналов и б – с коррекцией входных сигналов.

Для оценки эффективности защиты дальнего резервирования важным является возможность распознавания ею режимов ППН с селекцией вида повреждения. При этом требуется использование минимального набора таких информационных признаков, которые позволят получить непересекающиеся области режимов множественной ППН. В N – мерном пространстве информационных признаков (в рассматриваемом случае токи симметричных составляющих, фазные токи и их аргументы) возможно сформировать вектор $\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_{N1}, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N2})$, координаты которого характеризуют свойства защищаемого объекта [8]. Для оценки меры близости или подобия между режимами в N – мерном пространстве информационных признаков правомерным будет использование евклидовой метрики $D^2(v_{pk}, v_{ql}) = \sum_{j=1}^N (I_{pj}^j - I_{ql}^j)^2$, $p, q = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, k_p$; $l = 1, 2, \dots, k_q$, где I_{pj}^j –

значения j -го признака k -го подрежима p -го класса, т.е. режима v_{pk} ; I_{ql}^j – значения j -го признака l -го подрежима q -го класса, т.е. режима v_{ql} . Требуемый для распознавания результат может быть получен, если значение меры близости между режимами одного класса

Ψ_p стремится к минимальному значению $S(\Psi_p) = \sqrt{\frac{2}{k_p} \frac{1}{k_p - 1} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_p} D^2(v_{pk}, v_{pl})} \rightarrow \min$, а мера близости между режимами разных классов Ψ_p и Ψ_q стремится к максимальному

значению $R(\Psi_p, \Psi_q) = \sqrt{\frac{1}{k_p k_q} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_q} D^2(v_{pk}, v_{ql})} \rightarrow \max$, превышающему критическое

значение, т.е. значение уставки применительно к релейной защите. Величина меры близости между распознаваемым режимом v и классом $\Psi_g, g = 1, 2, \dots, n$, заданными своими режимами

$\{v_g\}$: $L(v, \{v_g\}) = \sqrt{\frac{1}{k_g} \sum_{g=1}^{k_g} D^2(v, v_g)}$ определяет среднеквадратичное расстояние между

режимом v и режимом класса Ψ_g . Повышение эффективности системы распознавания, в данном случае релейной защиты будет определяться получением экстремума $L(v, \{v_g\})$.

Задача распознавания аварийных режимов в многомерном пространстве N может быть разбита на ряд подзадач с понижением размерности и в предельном случае распознаваемые области могут быть представлены рядом областей в двумерном пространстве, как это показано на рис.4. Области режимов ППН в двумерном пространстве токов обратной и нулевой последовательности представлена на рис.4,а, из которого следует, что селекция видов повреждения практически невозможна, т.к. расстояние между режимами ВСД, АВД и САУ, АВУ соответственно не превышает 15% от номинального тока защищаемого трансформатора. Среднеквадратичное расстояние между режимом трехфазного КЗ при обрыве фазы на стороне высшего напряжения и режимами двухфазного КЗ на стороне низшего напряжения не превышает 33%, что также делает затруднительным распознавание рассматриваемых режимов. Особенно это проявляется при снижении мощности защищаемого трансформатора.

Использование двумерного пространства фазных токов (по величине двух больших токов из трех фазных токов) позволяет обеспечить селекцию режимов множественной продольно-поперечной несимметрии. При этом среднеквадратичные расстояния между любыми распознаваемыми режимами превышают значение 100% от номинального тока защищаемого трансформатора. Выбор особой фазы в режиме ППН можно обеспечить с помощью избирателя поврежденной фазы, контролирующего фазные токи и напряжения, например при обрыве рассматриваемой фазы A происходит снижение тока данной фазы и повышение напряжения по отношению к другим фазам.

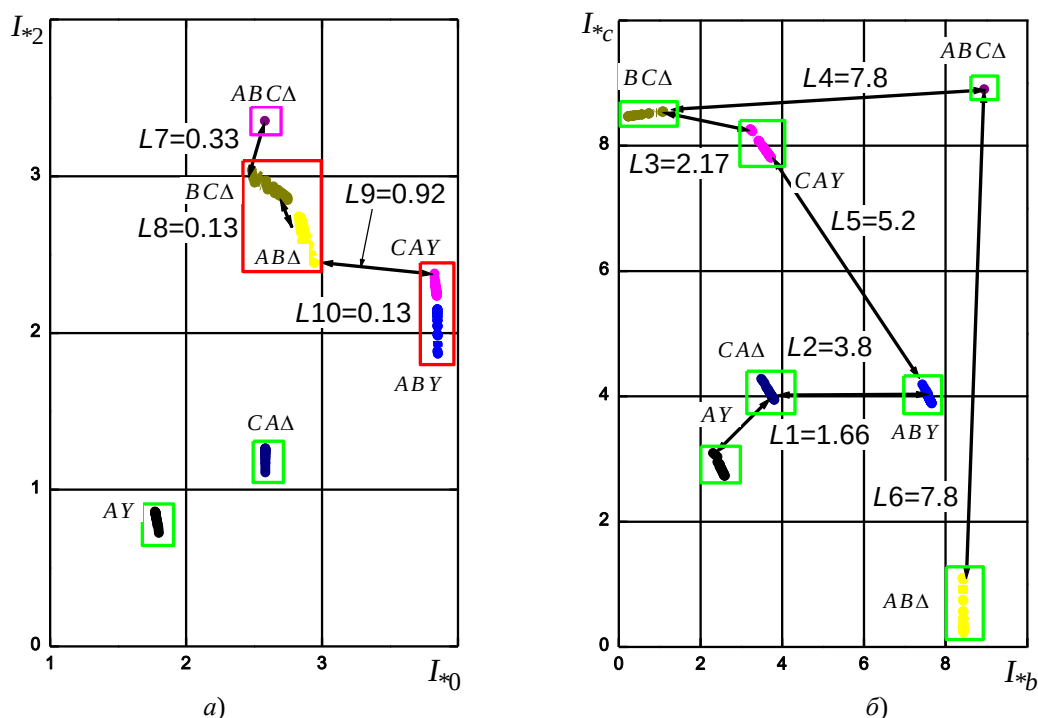


Рис. 4: Портреты режима продольно-поперечной несимметрии в плоскости «модуль-модуль» для симметричных составляющих (а) и для фазных токов (б)

Полученные результаты могут быть также использованы при построении защит ближнего резервирования (ЗБР) трансформатора. При этом предлагается выполнение максимально-токовых защит с контролем фазных токов, а не их разности, что позволяет реализовать ЗБР с требуемой чувствительностью.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для минимизации объема повреждений электрооборудования и его неселективного отключения в режимах множественной продольно-поперечной несимметрии на воздушных линиях с ответвительными подстанциями необходима установка специальной релейной защиты с повышенной распознаваемостью.
2. Максимальную токовую защиту трансформаторов ответвительных и проходных подстанций необходимо дополнить токовой защитой нулевой последовательности или выполнить ее в трехфазном исполнении с включением на фазные токи, что обеспечит требуемую чувствительность к режимам множественной продольно-поперечной несимметрии.
3. Выполнение селекции режимов множественной продольно-поперечной несимметрии на радиальных линиях с ответвительными подстанциями на основе контроля модулей и аргументов фазных токов и токов симметричных составляющих (аварийных составляющих), их соотношений с формированием областей возможных аварийных режимов с учетом предшествующего нагрузочного режима позволяет реализовать адаптивную релейную защиту, параметры срабатывания которой (токи срабатывания и выдержки времени) зависят от параметров текущего и предшествующего режимов работы линии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нагай В.И., Маруда И.Ф., Нагай В.В. Резервирование релейной защиты и коммутационных аппаратов электрических распределительных сетей. – Ростов н/Д: Изд-во журнала. «Изв. вузов. Сев-Кавк. регион», 2009 – 316с.
- [2] Маруда И.Ф. Релейная защита понижающих трансформаторов от коротких замыканий на линии при разрывах фаз // Электрические станции. – 2003. – №2. – С.44-46.

- [3] Маруда И.Ф. Релейная защита линий 110–220 кВ при разрывах фаз // Электрические станции. – 2002. – №1. – С. 40-42.
- [4] Чернин А.Б. Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.
- [5] Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 184 с.
- [6] Нагай И.В. Дальнее резервирование в сетях 6-110 кВ. Проблемы и решения // Новости электротехники. – 2010. – №6(66). – С. 28-30.
- [7] Нагай В.И., Нагай В.В., Нагай И.В. Адаптивные измерительные органы аварийных составляющих резервных защит электрических распределительных сетей// Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., г. Москва, 7-10 сентября 2009/ Науч.-инж. инф. агенство. М., 2009, С.134-140.
- [8] Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Высш. шк., 1984. – 208 с.
- [9] Никитин К.И., Клецель М.Я., Стинский А.С., Зайцева Н.М. Устройство резервной токовой защиты трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y. Патент РФ на изобретение №2353039 РФ от 09.01.2008. Бюл. № 11 от 20.04.2009.