

Совершенствование релейной защиты силовых трансформаторов главных понизительных подстанций промышленного предприятия с целью повышения ее чувствительности к режимам сложной несимметрии

Малафеев А. В., канд. техн. наук, Панова Е. А., инж.,
Болтачев В. А., Иркиенко И. В., магистранты

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова

Исследованы режимы аварийной сложной несимметрии в системе электроснабжения промышленного предприятия. Разработан алгоритм решения данной задачи, основанный на использовании методов последовательного эквивалентирования и симметричных составляющих, реализованный в оригинальном программном обеспечении. Выполнены расчет и анализ режимов аварийной сложной несимметрии в условиях Магнитогорского энергоузла. Дана оценка чувствительности релейной защиты силовых трансформаторов к режимам сложной несимметрии и для ее повышения разработана схема на базе реле напряжения обратной последовательности. Предложены рекомендации по уставкам данной защиты применительно к условиям Магнитогорского энергоузла.

Ключевые слова: система промышленного электроснабжения, режим сложной несимметрии, релейная защита силового трансформатора, чувствительность релейной защиты.

Современное крупное промышленное предприятие представляет собой комплекс взаимосвязанных технологических процессов, для реализации которых используется дорогостоящее электрооборудование. Возникновение аварийных режимов в системе промышленного электроснабжения приводит не только к недопуску продукции, но и к дополнительному износу этого оборудования, что обуславливает значительный экономический ущерб.

К наиболее распространенным видам аварий в системах электроснабжения относятся несимметричные режимы, вызванные КЗ либо обрывами проводов линий электропередачи, т. е. режимы однократной поперечной или продольной несимметрии. Кроме того, часто замыкание провода на землю или металлоконструкцию может быть следствием его обрыва, что приводит к появлению режима, сочетающего продольную и поперечную несимметрию в одной точке сети, т. е. режима сложной аварийной несимметрии. Расчет подобных аварийных режимов такого объекта, как система промышленного электроснабжения, с использованием распространенных программных комплексов затруднен ввиду того, что все они ориентированы в первую очередь на расчеты режимов работы энергосистем. Однако системы промышленного электроснабжения обладают рядом особенностей, среди которых можно выделить наличие замкнутых и разомкнутых участков с преобладанием последних, нескольких ступеней трансформации, собственных электростанций,

а также узлов связи с энергосистемой на различных уровнях напряжения. Для моделирования работы таких объектов предлагается программное обеспечение “Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0” [1], разработанный в МГТУ им. Г. И. Носова.

В состав комплекса входит модуль расчета сверхпереходных параметров режимов аварийной несимметрии произвольного вида. Расчет несимметричного режима основан на использовании модифицированного метода последовательного эквивалентирования [2] в сочетании с методом симметричных составляющих. Расчет выполняется отдельно для схем прямой, обратной и нулевой последовательностей с дальнейшим определением фазных параметров режима. Особенностью разработанного алгоритма является возможность моделирования КЗ либо обрыва при повреждении любой фазы (фаз), а также моделирования сложносимметричного режима в случае несовпадения фаз при обрыве и КЗ, например, обрыв фаз *A* и *B* с замыканием на землю *B* и *C* и в других сочетаниях.

С использованием программного комплекса было выполнено исследование режимов аварийной несимметрии в условиях Магнитогорского энергоузла (МЭУ), в состав которого входят системные подстанции “Смеловская” (АТГ-1 — 801 МВ · А, 500/220 кВ, АТ-3 — 200 МВ · А, 220/110 кВ) и “Магнитогорская” (2 × АТГ — 801 МВ · А, 500/220 кВ), узловы подстанции № 30 (2 × АТ — 250 МВ · А),

Таблица 1

Линия	Токи в линиях 110 – 220 кВ МЭУ в аварийных режимах, кА											
	$K^{(3)}$	$K^{(1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(3)} + L^{(1)}$	$K^{(1)} + L^{(1)}$	$K^{(2)} + L^{(1)}$	$K^{(1,1)} + L^{(1)}$	$K^{(3)} + L^{(2)}$	$K^{(1)} + L^{(2)}$	$K^{(2)} + L^{(2)}$	$K^{(1,1)} + L^{(2)}$
ПС № 96 – ЦЭС	8,43	8,82	7,83	11,1	4,26	4,26	4,18	6,2	6,2	4,98	3,89	5,78
ПС № 30 – ПС № 96	3,78	1,63	5,22	1,83	0,928	6,715	0,915	4,38	0,757	3,38	0,74	3,57
ПС № 30 – ПС № 60	6,17	6,57	5,56	8,29	2,78	5,52	2,73	4,72	2,58	3,81	2,53	4,34
ПС № 60 – “Смеловская”	4,53	4,17	4,21	4,38	2,05	5,47	3,48	0,596	2,07	4	2,81	0,549
ТЭЦ – ПС № 63	10,9	11,5	10,4	11,6	1,66	2,57	1,71	2,39	1,54	1,91	1,59	2,23
ТЭЦ – ПС № 77	5,75	6,96	5,79	6,81	2,23	4,55	2,06	3,78	2,08	3,04	1,91	3,64
ПС № 63 – ПС № 90	6,87	6,67	6,25	7,02	2,18	4,47	2,36	3,81	2,05	3,21	2,24	3,62
ПС № 90 – ПС № 77	4,27	5,27	3,82	5	3,43	4,69	3,51	4,62	3,22	3,79	3,28	4,34
ПС № 90 – “Магнитогорская”	8,68	7,89	6,87	8,45	1,44	2,58	1,52	2,42	1,35	2,06	1,29	2,27

№ 60 ($2 \times \text{AT} - 250 \text{ МВ} \cdot \text{А}$), № 90 ($2 \times \text{AT} - 250 \text{ МВ} \cdot \text{А}$) и № 77 ($2 \times \text{AT} - 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$) 220/110 кВ. Около половины потребляемой МЭУ электроэнергии вырабатывают собственные источники, наиболее крупными из которых являются ТЭЦ (330 МВт), ЦЭС (191 МВт) и ПВЭС-1,2 (107 МВт). Сеть 110 кВ образована двумя полукольцами — северным (ЦЭС — ПС № 30 — ПС № 60) и южным (ТЭЦ — ПС № 90 — ПС № 77). Связь МЭУ с энергосистемой осуществляется через шины 500 кВ системных подстанций, а также шины 220 кВ ПС № 90, связанные с Троицкой ГРЭС.

В табл. 1 приведены значения токов в некоторых линиях сети 110 и 220 кВ МЭУ в аварийных режимах симметричных и несимметричных КЗ и режимах сложной несимметрии. Для сравнения указанных режимов рассмотрены наибольшие фазные токи. Как видно, в большинстве случаев токи сложно-несимметричного режима либо соизмеримы с токами КЗ, либо оказались ниже их. Поскольку параметры срабатывания устройств релейной защиты выбираются из условий режима КЗ, она может оказаться нечувствительной к режимам сложной несимметрии, что приведет к длительному существованию аварийного режима. Для электроприемников цехов промышленного предприятия наибольший ущерб от несимметрии питающего напряжения возникает при повреждении малоудаленных линий, например, питающих

понижительные трансформаторы главных понижительных подстанций 220(110)/6(10) кВ.

В МЭУ для трансформаторов с высшим напряжением 110 и 220 кВ основной защитой от внутренних повреждений является дифференциальная защита (ДЗ), выполненная на базе реле ДЗТ-11 и РНТ-565, а от внешних КЗ — максимальная токовая защита (МТЗ) на основе реле РТ-40. На некоторых трансформаторах защита входит в состав микропроцессорных шкафов ШТ 2108.13, ШТ 2108.11, ШЭ2607 041, ШЭ2607 073, MiCOM P143, MiCOM P633. Расположение основных защит трансформаторов в сетях 110 – 220 кВ МЭУ представлено на рис. 1.

Для оценки чувствительности защит силовых трансформаторов выполнены расчеты режимов при обрыве линий (питающих тупиковые и проходные подстанции): с одновременным замыканием фазы на землю; с одновременным межфазным замыканием; с одновременным двухфазным замыканием на землю. Наихудшие условия с точки зрения чувствительности релейной защиты силовых трансформаторов возникают при замыкании поврежденной линии со стороны трансформатора, так как в данном случае наблюдается наименьшая подпитка тока КЗ со стороны питающей сети. Диапазон зафиксированных коэффициентов чувствительности для ДЗ в таких режимах — от 0,0004 до 0,06; для МТЗ — от 0,04 до 0,09, хотя требуемый коэффициент чувствительности согласно ПУЭ составляет 1,5 – 2,0.

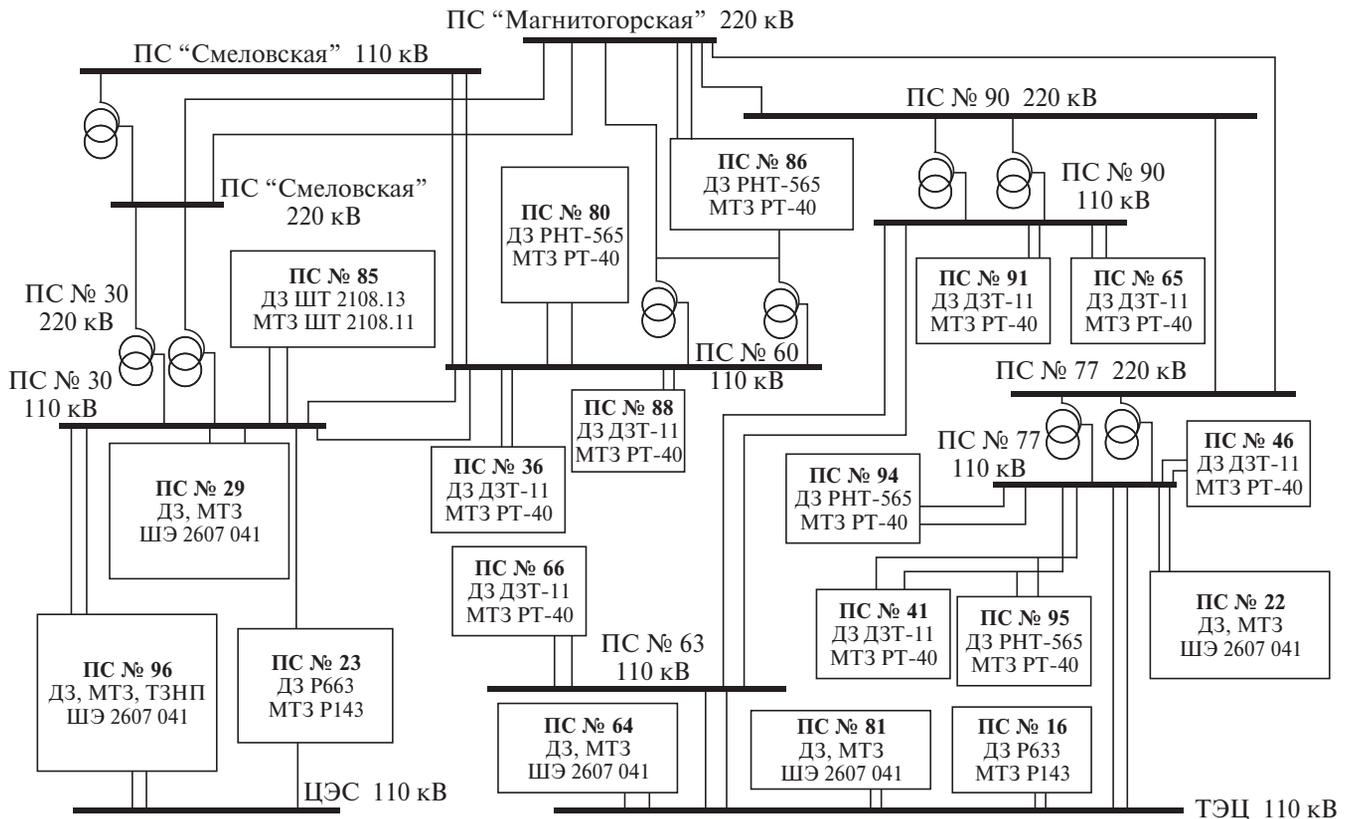


Рис. 1

В качестве примера в табл. 2 приведены расчетные коэффициенты чувствительности ДЗ и МТЗ трансформатора к повреждениям $L^{(1)} + K^{(1)}$ для некоторых объектов, защита которых выполнена на различной элементной базе. Ток срабатывания ДЗ рассчитан с учетом тормозной характеристики реле либо терминала. По результатам расчетов можно сделать вывод, что токовая защита не отвечает требованиям в части чувствительности, поэтому необходима разработка мероприятий по повышению чувствительности защиты трансформаторов к режимам аварийной сложной несимметрии. Ввод пуска МТЗ по напряжению не обеспечит достаточную ее чувствительность к указанным режимам, так как токи в данном случае соизмеримы с рабочими токами, в то время как наблюдается значительное искажение симметрии напряжения.

Для повышения чувствительности защит трансформаторов предлагается специальная защита, которая будет удовлетворять нужным требованиям. Это защита с фильтровыми реле напряжения обратной последовательности.

При расчетах для рассмотренных выше режимов были получены значения напряжений обратной последовательности. Наимень-

шие их значения наблюдаются при обрыве линии и замыкании ее на землю. Поэтому такой режим может быть принят в качестве разновидности минимального. Например, для ПС № 94 напряжение обратной последовательности U_2 при обрыве фазного провода и замыкании его на землю со стороны трансформатора составляет 10,8 кВ на стороне ВН. Во вторичной цепи U_2 составляет 9,82 В.

Проанализируем применение фильтрового реле напряжения РНФ-1М в качестве органа, реагирующего на возникновение режимов сложной несимметрии. Данное реле собрано по трехфазной схеме, и в нормальном режиме суммарное напряжение на его обмотках равно нулю. При повреждении в реле возникает напряжение обратной последовательности и оно срабатывает. Диапазон уставок реле РНФ-1М — от 6 до 12 В. При уставке 9 В коэффициент чувствительности для рассмотренного выше объекта составляет 1,09. Следовательно, защита на базе данного реле будет чувствительна к возникновению режимов сложной несимметрии и поэтому может быть рекомендована к практическому применению. Разработанная схема защиты с реле РНФ-1М, которую предлагается использовать в качестве дополнения к ДЗ и МТЗ силовых

Таблица 2

Объект	$I_{ф.авар.реж}, А$	$I_{диф}, А$	$I_{срДЗ}, А$	$I_{срМТЗ}, А$	$k_{ч} ДЗ$	$k_{ч} МТЗ$
ПС № 46	49	18,19	580,16	700	0,031	0,07
ПС № 22	62	22,76	401	720	0,06	0,06
ПС № 95	62	127,8	410	750	0,31	0,09
ПС № 16	33	54,7	160	1000	0,34	0,03
ПС № 88	14	6,54	302,05	450	0,022	0,03
ПС № 65	9	3,94	192,03	250	0,021	0,04
ПС № 66	25,8	11,4	630,04	400	0,018	0,08
ПС № 36	9,7	0,31	189,16	350	0,002	0,03
ПС № 41	19,1	7,25	510,03	600	0,014	0,014
ПС № 64	33,6	13,2	420,4	1500	0,03	0,031
ПС № 81	19,1	0,12	316	480	0,0004	0,04
ПС № 85	12,5	3,12	162	400	0,019	0,019

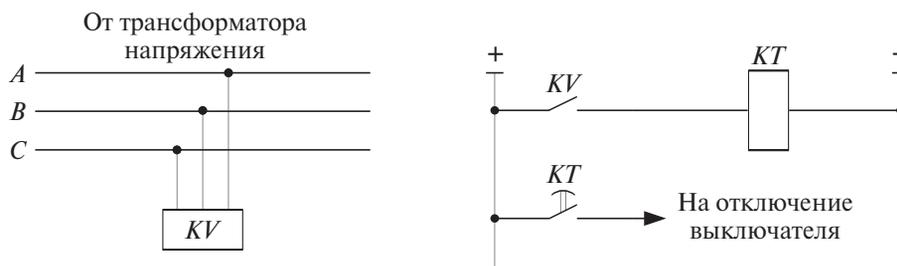


Рис. 2

трансформаторов, приведена на рис. 2, где KV и KT — реле напряжения обратной последовательности и реле времени. Рекомендуемые уставки защиты силовых трансформаторов от указанных режимов для других рассмотренных подстанций приведены в табл. 3.

Повысить чувствительность релейной защиты, выполненной на базе микропроцессорных шкафов ШЭ 2607 041, ШТ 2108.13 и MiCOM P633, предлагается путем перепрограммирования, используя в качестве измерительных органов незадействованные входы по напряжению обратной последовательности. При выполнении резервных защит в терминале MiCOM P143 возможен ввод защиты от повышения напряжения обратной последовательности.

Для обеспечения селективности данного вида защиты следует выполнять ее с выдержкой времени, отстроенной от существ-

вующей уставки по времени срабатывания МТЗ на одну ступень селективности (0,5 с).

Для оценки экономической эффективности предлагаемых мероприятий рассчитан ущерб от возникновения сложносимметричных режимов с учетом затрат на покупку и монтаж реле. В качестве примера рассмотрим расчет ущерба применительно к синхронным двигателям в ЛПЦ-5 ОАО «ММК». Расчет выполнен по предложенной в [3] методике, согласно которой функциональная зависимость электромагнитной составляющей ущерба от коэффициента обратной последовательности имеет следующий вид:

$$U = (97\,000 T \Delta P_{м.ном} \beta + 16 K^{(сд)}) \varepsilon^2,$$

где $K^{(сд)}$ — увеличение амортизационных отчислений, руб.; T — время работы двигателя в сложносимметричном режиме, ч/год; $\Delta P_{м.ном}$ — номинальные потери в меди, кВт; β — стоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч); ε —

Таблица 3

Объект, трансформатор	U , кВ	U_1 , кВ	U_2 , кВ	$U_{\text{вторичной обмотки}}$, В	$U_{2\text{сраб}}$, В	$k_{\text{ч}}$	$t_{\text{сраб}}$, с
ПС № 46, Т1	39,7	10,7	10,7	9,73	9	1,08	4
ПС № 46, Т2	39,7	10,67	10,67	9,70	9	1,08	4
ПС № 22, Т1, Т2	40,2	10,8	10,8	9,82	9	1,09	2
ПС № 94, Т1	40,2	10,8	10,8	9,82	9	1,09	2
ПС № 94, Т2	40,19	10,86	10,7	9,73	9	1,08	3,5
ПС № 95, Т1, Т2	40,2	10,77	10,77	9,79	9	1,09	6
ПС № 16, Т1, Т2	40,58	10,88	10,87	9,88	9	1,1	4
ПС № 64, Т1, Т2	40,57	10,87	10,87	9,88	9	1,1	5,5
ПС № 81, Т1, Т2	40,57	10,87	10,87	9,88	9	1,1	4
ПС № 65, Т1	40,9	10,96	10,96	9,96	9	1,11	3
ПС № 65, Т2	40,89	10,96	10,96	9,96	9	1,11	2
ПС № 66, Т2	40,57	10,87	10,87	9,88	9	1,1	3
ПС № 91, Т1	40,9	10,96	10,96	9,96	9	1,11	3
ПС № 91, Т2	40,9	10,96	10,96	9,96	9	1,11	3
ПС № 80, Т1	38,7	10,7	10,7	9,73	9	1,08	2,5
ПС № 80, Т2	39,4	10,67	10,67	9,70	9	1,08	3,3
ПС № 85, Т1	38,2	10,8	10,8	9,82	9	1,09	2,5
ПС № 29, Т1	40,99	10,86	10,7	9,73	9	1,08	2,9
ПС № 29, Т2	41	10,77	10,77	9,79	9	1,09	2,9
ПС № 36, Т1	40,7	10,87	10,87	9,88	9	1,09	3
ПС № 96, Т1	40,57	10,87	10,87	9,88	9	1,09	3
ПС № 87, Т1	40,9	10,96	10,96	9,96	9	1,11	5,2
ПС № 23, Т1	40,89	10,96	10,96	9,96	9	1,11	2
ПС № 41, Т1	40,2	10,88	10,88	9,89	9	1,1	1,3
ПС № 31, Т3	40,7	10,87	10,87	9,88	9	1,1	2

коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности.

Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации № 1 от 01.01.2002 “О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы”, норма амортизационных отчислений для высоковольтных электродвигателей составляет 0,56 %. Стоимость электроэнергии от энергоснабжающей организации по состоянию на 2010 г. равна 2,26 руб/(кВт · ч). При расчет-

ном коэффициенте $\varepsilon = 7\%$ на шинах 10 кВ в данном режиме и времени существования аварийного режима 1 ч ущерб для двигателей типа СДЗ составит 26 614 руб. Суммарный ущерб от режима сложной несимметрии для данного объекта оценивается в 447 060 руб.

Затраты на покупку и монтаж защиты предлагаемого вида составят 5850 руб., из них стоимость самого реле РНФ-1М равна 3960 руб. (с НДС), стоимость реле времени РВ-01М — 1390 руб., затраты на монтаж —

500 руб. Поскольку такая защита устанавливается на каждый трансформатор, суммарные затраты на установку защиты с реле РНФ-1М составляют 11 700 руб.

Экономическая эффективность установки реле РНФ-1М на данном объекте определяется разницей между суммой устраненного ущерба и затратами на покупку и монтаж релейной защиты и составляет около 450 тыс. руб/год.

Выводы

1. Разработанный алгоритм расчета режимов аварийной продольной, поперечной и сложной несимметрии разных видов применим для систем промышленного электро-снабжения.

2. Созданный на базе предложенного алгоритма программный модуль, входящий в состав комплекса “КАТРАН 6.0”, позволил выполнить расчеты режимов аварийной сложной несимметрии. При повреждении линий в сети 110 – 220 кВ МЭУ токи в этих

режимах ниже токов КЗ либо соизмеримы с ними, что может привести к несрабатыванию устройств релейной защиты и длительному существованию аварийного режима.

3. Чувствительность релейной защиты силовых трансформаторов к режимам сложной несимметрии можно повысить, используя предложенную схему на базе реле РНФ-1М.

Список литературы

1. А.с. 2012612069 РФ. Программа для ЭВМ “Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0 / В. А. Игуменцев, А. В. Малафеев, О. В. Буланова и др. — Оpubл. в бюл. “Программы для ЭВМ, БД, ТИМС”, 2012, № 2.
2. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения / В. А. Игуменцев, Б. И. Заславец, А. В. Малафеев и др. — Промышленная энергетика, 2008, № 6.
3. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. — М.: Энергоатомиздат, 2000.

panova.ea@gmail.com

