

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ЗАЩИТА ШИН И ОТХОДЯЩИХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ

М.Я. Клецель, Н.М. Кабдуалиев*, Б.Е. Машрапов*

Томский политехнический университет

*Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

E-mail: bokamashrapov@mail.ru

Актуальность: защиты, обычно применяемые в сетях напряжением 6–10 кВ, отключают без выдержки времени дуговые замыкания только в отсеке сборных шин ячейки комплектного распределительного устройства, а короткие замыкания в отсеке трансформаторов тока и кабельной разделки либо отключают с выдержкой времени, либо не выявляются по принципу действия.

Цель работы: создать защиту, способную выявлять дуговые замыкания на шинах и в любых отсеках комплектных распределительных устройств на основе контроля электрических параметров.

Результаты: предложена защита, контролирующая токи подпитки от электродвигателей, способная селективно отключать без выдержки времени междуфазные короткие замыкания на шинах, в ячейках комплектных распределительных устройств и в отходящих присоединениях. Даны алгоритм функционирования и оценка чувствительности. Показано, как область использования зависит от длины кабеля и мощности нагрузки.

Ключевые слова:

Защита, дуговые замыкания, токи подпитки от электродвигателей, кабель, нагрузка.

Введение. В качестве защиты элементов сетей 6...10 кВ от междуфазных коротких замыканий обычно применяется максимальная токовая защита (МТЗ) [1]. Она обладает малым быстродействием при коротких замыканиях на шинах, от которых питаются присоединения 6...10 кВ, и не обеспечивает своевременного отключения дуговых коротких замыканий в ячейках комплектных распределительных устройств (КРУ). В результате почти каждое дуговое замыкание сопровождается значительными повреждениями. Имеются многочисленные предложения по построению защит от дуговых замыканий с помощью неэлектрических датчиков, не получивших распространение из-за тех или иных недостатков, среди которых не последнюю роль играют сложность обслуживания и стоимость оборудования. В настоящее время дуговые замыкания на шинах могут быть отключены логической защитой шин, которая выпускается известной в России фирмой «Механотроника», и широко внедряется. Она построена на основе устройства по [2] и отключает ввод питания без выдержки времени, если запустилась МТЗ ввода и не запустились МТЗ отходящих присоединений. Однако «логическая», как и дифференциальная, защита шин по принципу действия не выявляет дуговые замыкания в отсеках кабельной разделки, где эти замыкания наиболее вероятны.

Идея работы. Определение поврежденного из присоединений, подключенных к шинам, по соотношениям токов в них и на вводе питания.

Обоснование возможности построения защит на основе контроля токов $I_{\text{подп}}$ подпитки от электродвигателей. Известно, что при близком внешнем коротком замыкании (КЗ) электродвигатели переменного тока (ЭД) переходят в режим генератора, подпитывая точку КЗ, если остаточное на-

пряжение на шинах $U_{\text{ост}} \leq 0,5U_{\text{н}}$, где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение на шинах, от которых они питаются. Для построения защит важно знать величины $I_{\text{подп}}$, углы сдвига фаз между ними и между каждым из них и системой, а также, как все эти величины изменяются во времени. Расчеты [3, 4] и эксперименты [5–8] показали:

1. Ток подпитки от высоковольтных ЭД мощностью 200 кВт и более через 0,01 с после начала двухфазного КЗ составляет не менее $0,8I_{\text{н}}$ [5], а трехфазного – $0,9I_{\text{н}}$ [4, 6, 7], через 0,04 с он превышает номинальный. Если место КЗ подпитывается асинхронными и синхронными ЭД, то токи от асинхронных через 0,02 с могут уменьшиться до номинальных [5].
2. Сдвиг фаз токов в безаварийных режимах для асинхронного ЭД может достигать $70...85^\circ$, синхронных – $150...170^\circ$. В момент возникновения КЗ, когда ЭД начинает подпитывать точку КЗ, фазы его токов резко меняются (почти на 180°), а угол сдвига фаз между током от системы и от ЭД через 0,01 с после КЗ меняется не более чем на 15° , через 0,02 – на $30...50^\circ$, но уже через 0,05 с – на $90...120^\circ$ [3]. Максимальное расхождение фаз токов отдельных ЭД через 0,01 с не превышает 5° , а через 0,12 с – 22° [8].

Из изложенного следует, что при КЗ на шинах и вблизи них токи от ввода питания и $I_{\text{подп}}$ совпадают по фазе в течение 0,01...0,02 с. Причем, величина $I_{\text{подп}}$ более чем достаточна для их фиксации за это время. Поскольку при формулировке условия срабатывания защиты используется закон Кирхгофа, применяемый к абсолютным значениям токов, то она должна выявлять КЗ в течение 0,01...0,02 с, что при современных возможностях реализации не представляет трудностей.

Принцип построения защиты. Согласно первому закону Кирхгофа в безаварийных режимах:

$$I_B = \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{j=1}^m I_{Wj}, \quad (1)$$

где I_B – ток на вводе; I_i – ток в i -м электродвигателе; I_{Wj} – ток в j -й линии, отходящей от общих шин; n – количество электродвигателей; m – количество линий.

При КЗ на k -м ЭД или s -й линии, отходящих от общих шин, учитывая, что фазы токов ЭД и ввода совпадают, а неповрежденные линии могут продолжать нести нагрузку, можно записать следующие соотношения:

$$I_k^{K3} = \sum_{i=1}^{n, i \neq k} I_i^{K3} - \sum_{j=1}^m I_{Wj}^{K3} + I_B^{K3}, \quad (2)$$

$$I_{W_s}^{K3} = \sum_{i=1}^n I_i^{K3} - \sum_{j=1}^{m, j \neq s} I_{Wj}^{K3} + I_B^{K3}, \quad (3)$$

где $I_k^{K3} (I_{W_s}^{K3})$ – модуль тока в поврежденном k -м двигателе (s -й линии); $I_i^{K3} (I_{Wj}^{K3})$ – модуль тока в неповрежденном i -м двигателе (j -й линии); I_B^{K3} – модуль тока на вводе.

В равенствах (2) и (3) использованы абсолютные значения токов, поскольку они выполняются только при КЗ.

Если короткое замыкание происходит на шинах, равенства (1)–(3) не выполняются ни для тока на вводе, ни для тока в каком-либо присоединении, и $I_B > I_{XX}$, где I_{XX} – ток холостого хода на вводе (со стороны низшего напряжения питающего трансформатора, когда все присоединения отключены).

При наличии двух секций шин, соединенных секционным выключателем, рассматривается питание их потребителей от одного ввода. Тогда при коротких замыканиях на ЭД или какой-либо из линий в выражения (2) и (3) вводятся дополнительные слагаемые, соответствующие токам в присоединениях второй секции шин.

Для срабатывания защиты на отключение k -го ЭД или s -й линии вторичные токи, полученные от преобразователей их токов, должны равняться сумме вторичных токов на остальных присоединениях, то есть:

$$I_{iB}^{K3} = \frac{I_k^{K3}}{n_{nk}} = \sum_{i=1}^{n, i \neq k} \frac{I_i^{K3}}{n_{ni}} - \sum_{j=1}^m \frac{I_{Wj}^{K3}}{n_{nj}} + \frac{I_B^{K3}}{n_{nB}} = \sum_{i=1}^{n, i \neq k} I_{iB}^{K3} - \sum_{j=1}^m I_{WjB}^{K3} + I_{BB}^{K3} = A_1; \quad (4)$$

$$I_{W_sB}^{K3} = \frac{I_{W_s}^{K3}}{n_{nS}} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i^{K3}}{n_{ni}} - \sum_{j=1}^{m, j \neq s} \frac{I_{Wj}^{K3}}{n_{nj}} + \frac{I_B^{K3}}{n_{nB}} = \sum_{i=1}^n I_{iB}^{K3} - \sum_{j=1}^{m, j \neq s} I_{WjB}^{K3} + I_{BB}^{K3} = A_2, \quad (5)$$

где n_{nk} и n_{nS} – коэффициенты преобразования тока (для электромагнитных трансформаторов тока это коэффициенты трансформации) преобразователей k -го ЭД и s -й линии; $n_{ni} (n_{nj})$ – коэффициент преобразования тока i -го (j -го) преобразователя; n_{nB} – коэф-

фициент преобразования тока преобразователя ввода.

Но из-за погрешностей преобразователей и реализующих защиту устройств, измеряемый ток I_{iB}^{K3} может оказаться больше или меньше указанной суммы. При погрешностях преобразователя ε_1 и устройства ε_2 коэффициенты q_1 и q_2 , соответствующие суммарным максимальным погрешностям, действующим в сторону уменьшения и увеличения (погрешностями расчетов пренебрегаем):

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \frac{100\% - e_1 - e_2}{100\%}, \\ q_2 &= \frac{100\% + e_1 + e_2}{100\%}. \end{aligned} \right\}$$

Очевидно, что для срабатывания устройства в наихудших вариантах влияния погрешностей должны выполняться следующие равенства:

$$\left. \begin{aligned} I_k^{K3} \frac{1}{n_{nk}} &= q_2 A_1, \\ q_2 \frac{I_k^{K3}}{n_{nk}} &= q_1 A_1. \end{aligned} \right\}$$

Из этих равенств видно, что крайние значения I_{iB}^{K3} равны $\frac{q_2}{q_1} A_1$ и $\frac{q_1}{q_2} A_1$. Откуда следует, что защита должна срабатывать на отключение k -го ЭД, если измеренный ток I_{iB}^{K3} попадает в диапазон:

$$\frac{q_1}{q_2} A_1 \leq I_{iB}^{K3} \leq \frac{q_2}{q_1} A_1. \quad (6)$$

Рассуждая аналогично, получаем диапазон значений токов $I_{W_sB}^{K3}$, при котором защита должна срабатывать на отключение s -й линии:

$$\frac{q_1}{q_2} A_2 \leq I_{W_sB}^{K3} \leq \frac{q_2}{q_1} A_2. \quad (7)$$

Программная реализация. Структурная схема алгоритма функционирования защиты при КЗ на присоединениях представлена на рис. 1. Из токов $I_1, \dots, I_n, I_{W1}, \dots, I_{Wm}, I_B$ и напряжения U , подводимых к измерительным преобразователям, после обработки в блоке Ф получают абсолютные значения токов $I_{1B}, \dots, I_{nB}, I_{W1B}, \dots, I_{WmB}, I_{BB}$ и напряжения на шинах $U_{ш}$. Вычисляются значения переменных $I_{iB}^{K3}, \dots, I_{nB}^{K3}$ и $I_{W_sB}^{K3}, \dots, I_{W_mB}^{K3}$ по (4) и (5). Контролируется выполнение неравенства $U_{ш} \leq 0,45U_n$. Если «да», то проверяется неравенство (6) для тока в каждом ЭД. Тот ЭД, для которого оно выполняется, отключается. При невыполнении (6) ни для одного из ЭД проверяется неравенство (7) для тока в каждой линии. Та линия, для которой оно выполняется, отключается. Если (7) не выполняется ни для одной из линий, указанные операции повторяются заново.

Чувствительность и область использования защиты. Покажем, что защита всегда чувствительна к междуфазным дуговым КЗ на шинах и в ячейках КРУ, а также и в кабеле, если токи КЗ в его конце

достаточны для понижения напряжения на шинах до $U_{ост} = 0,45U_n$ (принято с запасом 10%), позволяющего ЭД перейти в режим генератора. Длина l защищаемой части кабеля для нагрузки с номинальной мощностью S_n , подключенной к нему, определяется из следующих соображений. В соответствии с законом Ома и предельно допустимой величиной $U_{ост} = 0,45U_n$ можно записать

$$0,45U_n = \sqrt{3}I_{кз}^{(3)}R_k; \quad (8)$$

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{U_n}{\sqrt{3}(\sqrt{X_\Sigma^2 + R_k^2})}; R_k = \frac{\rho l}{s_k}, \quad (9)$$

где $I_{кз}^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания при КЗ в конце защищаемой части кабеля; R_k – активное сопротивление кабеля (индуктивным пренебрегаем); X_Σ – суммарное сопротивление элементов системы до шин, от которых отходит поврежденное присоединение; s_k – сечение кабеля; ρ – удельное сопротивление материала жилы; l – длина кабеля.

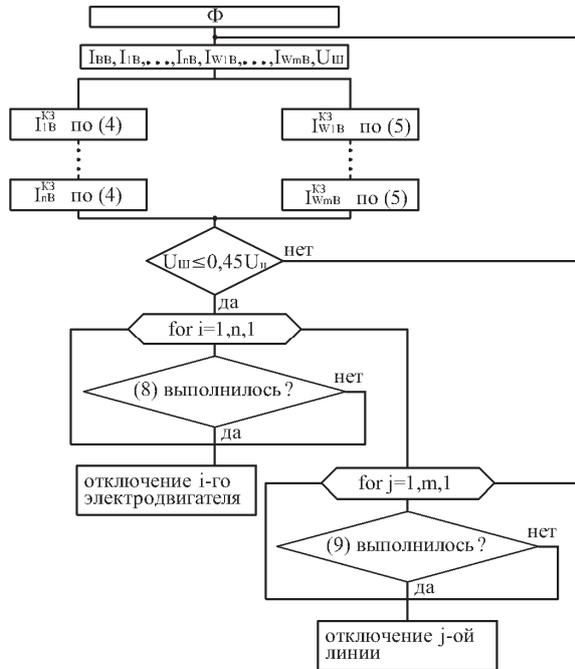


Рис. 1. Структурная схема алгоритма функционирования защиты

Выбор сечения кабеля s_k для заданной мощности S_n проводим в соответствии с существующими требованиями [4]. Площадь s_k сечения выбирается по экономической плотности. Выражая номинальный ток I_n нагрузки через S_n , имеем:

$$s_k = \frac{S_n}{\sqrt{3}JU_n}, \quad (10)$$

где J – нормированное значение экономической плотности тока.

Из (9), используя (8) и (10), получаем:

$$l = \frac{S_n X_\Sigma}{3,43\rho U_n J}.$$

По этой формуле строятся зависимости l от S_n . Для примера на рис. 2 они приведены для потребителей, питающихся от трансформаторов 25, 32, 40, 63 МВА собственных нужд электрических станций энергоблоков 200, 300, 500, 800 МВт, соответственно (зависимости начинаются с $S_n = 200$ кВА, так как это минимальная мощность двигателя, который может быть подключен к шинам 6 кВ). При этом принималось $J = 1,2$ А/мм² и кабель не проверялся на термическую стойкость или невозгорание. Если проверка на термическую стойкость или невозгорание показала, что необходим кабель с другим стандартным сечением, то из (10) находится соответствующая ему мощность нагрузки, а затем по рис. 2 – длина. Из рис. 2 видно, что при нагрузке свыше 1 МВА в зону защиты будет входить весь кабель. Расчеты показывают, что весь кабель часто защищается и при меньших мощностях.

Отметим, что при междуфазных КЗ в ячейках комплектных распределительных устройств и на шинах 6...10 кВ $R_k = 0$, но появляется дуга, сопротивление R_d которой должно быть учтено при определении остаточного напряжения и тока КЗ. Известно [9, 10], что R_d уменьшает ток $I_{кз}^{(3)}$ не более чем на 12%, а напряжение на ней не превышает 1000 В. Поэтому на действие защиты при указанных КЗ R_d влияния не оказывает.

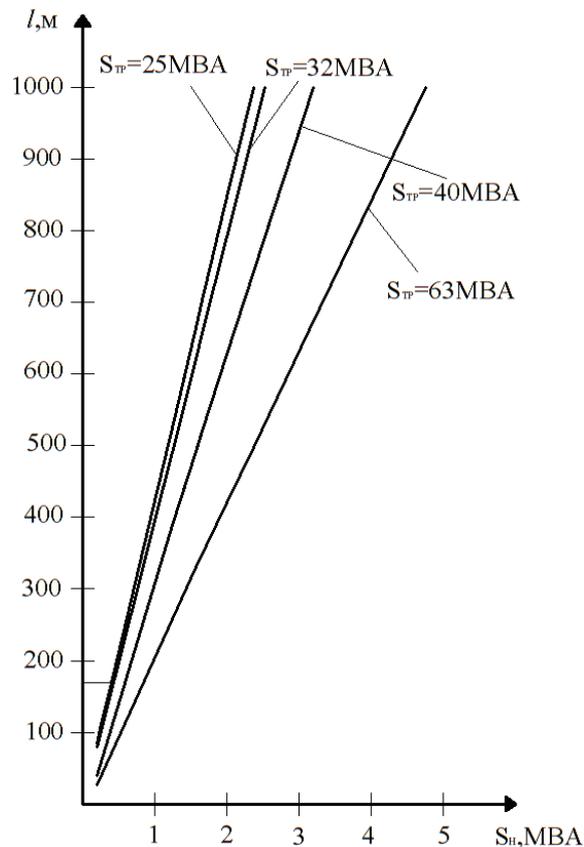


Рис. 2. Зависимость длины защищаемой части кабеля от его нагрузки и мощности питающего трансформатора.

Выводы

Разработанная общая защита ячеек комплектных распределительных устройств и шин от междофазных дуговых замыканий обладает достаточным быстродействием и чувствительностью. Она отключает без выдержки времени и КЗ в кабеле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электропитания. – М.: Высш. Шк., 2008. – 639 с.: ил.
2. Устройство для централизованной токовой защиты сети: а.с. 1644287 СССР, заявл. 30.12.87; опубл. 23.04.91, Бюл. № 15. – 3 с.
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
4. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 964 с.
5. Жуков В.В. Неклепаев Б.Н. Токи короткого замыкания узлов двигательной нагрузки // Изв. высш. учебн. заведений. Электромеханика. – 1967. – № 9. – С. 954–960.

При этом длина той части кабеля, которая защищается, зависит от мощности присоединенной к нему нагрузки и мощности питающего трансформатора (часто это весь кабель). Для реализации полученных алгоритмов функционирования защиты необходима микропроцессорная элементная база.

6. Ливанов О.В. и др. Влияние асинхронных двигателей на токи КЗ в системе собственных нужд // Электрические станции. – 1965. – № 11. – С. 48–54.
7. Ойрех Я.А., Сивокобыленко В.Ф. Режимы самозапуска асинхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1974. – 180 с.
8. Линдорф Л.С. и др. Влияние синхронных двигателей на токи короткого замыкания // Электрические станции. – 1967. – № 7. – С. 44–51.
9. Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.
10. Нагай В.И., Нагай И.В., Украинцев А.В., Киреев П.С., Сарры С.В. Коррекция сигналов резервных защит при наличии переходного сопротивления электрической дуги // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматизации энергосистем: сб. докладов Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013.

Поступила 17.06.2013 г.

UDC 621.316

FAST-OPERATING PROTECTION OF BUSBARS AND OUTGOING CONNECTIONS WITH VOLTAGE OF 6–10 kV

M.Ya. Kletsel, N.M. Kabdualiyev*, B.E. Mashrapov*

Tomsk Polytechnic University

* S. Toraygyrov Pavlodar State University

Relevance: protections usually used in networks with voltage range from 6 to 10 kV switch off arc circuits only if they occur in compartment of assembled busbars of switchgear assembly without time delay; short circuits occurred in compartment of current transformers and cabling place either with time delay or they are not detected by operating principle.

Aim: to build the protection able to detect arc circuits on busbars and in any compartments of switchgear assembly based on control of electric parameters.

Results: the authors proposed the protection controlling adjunction currents from electric motors and able to selective switch-off without time delay of interphase short circuits on busbars, in cells of switchgear assemblies and on outgoing connections. The operation algorithm and sensitivity estimation are given. The field of use dependence on cable length and load power is shown.

Key words:

Protection, arcing fault, seed current of electric motors, cable, load.

REFERENCES

1. Andreev V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika system elektro-snabzheniya* (Relay protection and automatics of electrical supply systems). Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2008. 639 p.
2. Bolgartsev G.E., Kletsel M.Ya., Nikitin K.I., Shatokhin V.M. *Ustroystvo dlya tseentralizovannoy tokovoy zashchity seti* (The device for centralized current protection of network). a.s. 1644287 USSR, 1991.
3. Ulyanov S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy* (Electromagnetic transients). Moscow, Energiya Publ., 1970. 520 p.
4. Gerasimov V.G. *Elektrotekhnicheskii spravochnik*. *Proizvodstvo, peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii* (Electrical Engineering Handbook. Generation, transmission and distribution of electrical energy). Moscow, MEI Publ., 2004. 4, 964 p.
5. Zhukov V.V. Neklepaev B.N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 1967. 9, pp. 954–960.

6. Livanov O.V. *Elektricheskie stantsii*, 1965. 11, pp. 48–54.
7. Oyrehk Ya.A., Sivokobylenko V.F. *Rezhimy samozapuskasinkhronnykh elektrodvigatelay* (Modes of induction motor self-running). Moscow, Energiya Publ., 1974. 180 p.
8. Lindorf L.S. *Elektricheskie stantsii*, 1967. 7, pp. 44–51.
9. Nagay V.I. *Releynaya zashchita otvetvitelnykh podstantsiy elektricheskikh setey* (Relay protection of the derived substations of electric networks). Moscow, Energoatomizdat Publ., 2002. 312 p.
10. Nagay V.I., Nagay I.V., Ukraintsev A.V., Kireev C.V., Sarry S.V. *Korreksiya signalov rezervnykh zashchit pri nalichii perekhodnogo soprotivleniya elektricheskoy dugi* (Correction of signals of back-up protections with electric arc transient resistance). *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (Proc. of the International Scientific and Technical Conference). Ekaterinburg, 2013.