

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОДНОСИСТЕМНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ДВУХКОНЦЕВЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Цыгулев Н.И., д.т.н., проф., Проус В.Р., к.т.н., доц.

(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия)

В автономных электроэнергетических системах (АЭС) подвижных объектов в качестве первичных преобразователей тока устройств релейной защиты и автоматики находят применение трансреакторные преобразователи с магнитодиэлектрическими магнитопроводами (магнитодиэлектрические преобразователи тока – МПТ) [1, 2]. Последние имеют разъемную конструкцию и малые массогабаритные параметры по сравнению с традиционными трансформаторами тока с замкнутыми ферромагнитными сердечниками, что позволяет устанавливать их в распределительных устройствах без демонтажа токопроводов. Распределительные сети судовых АЭС, как правило, выполняются с изолированной нейтралью. Это позволяет для двухконцевых элементов сети (например, синхронных генераторов) реализовать дифференциальную защиту по схеме с уравновешенными напряжениями в двухфазном односистемном исполнении, т.е. содержащую одну измерительную и одну логические части.

На рисунке 1 приведена схема односистемной дифференциальной защиты синхронного генератора с алгоритмом формирования тормозного сигнала – торможение максимальной разностью потенциалов F_1-F_3 [2], а на рисунке 2 представлена схема замещения ее измерительной части, с учетом кольцевой схемы замещения МПТ. На схеме замещения приняты следующие обозначения: i_1, i_2 – токи в цепях первичной и вторичной обмоток разделительного трансформатора (Т); $e_1 - e_4$ – э. д. с. первичных МПТ; $r_1 - r_4$ – активные сопротивления вторичных обмоток МПТ; $L_1 - L_4$ – индуктивности рассеивания МПТ; R_1, R_2, L_T, L_δ – активные сопротивления и индуктивности первичной и вторичной обмоток разделительного трансформатора; u_1, u_2, u_{12} – напряжения на входах выпрямительного моста М1.

При разработке математической модели дифференциальной защиты приняты следующие допущения и начальные условия. Сопротивление тормозного резистора принимается высокоомным ($R_T \geq 20$ кОм), поэтому контур АВС схемы замещения (см. рисунок 2) рассматривается как гальванически не связанный с другими контурами, т.е. по цепи этого контура протекает один и тот же ток i_1 . Э.д.с. преобразователей МПТ1–МПТ4 определяются в соответствии с законом электромагнитной индукции как

$$e_j = k \frac{di_j}{dt} \cdot \frac{dB}{dH}, \quad j \in \overline{1,4}, \quad (1)$$

где i_j – первичные токи в цепях фаз генератора (см. рисунок 1);

k – коэффициент, учитывающий конструктивные параметры МПТ.

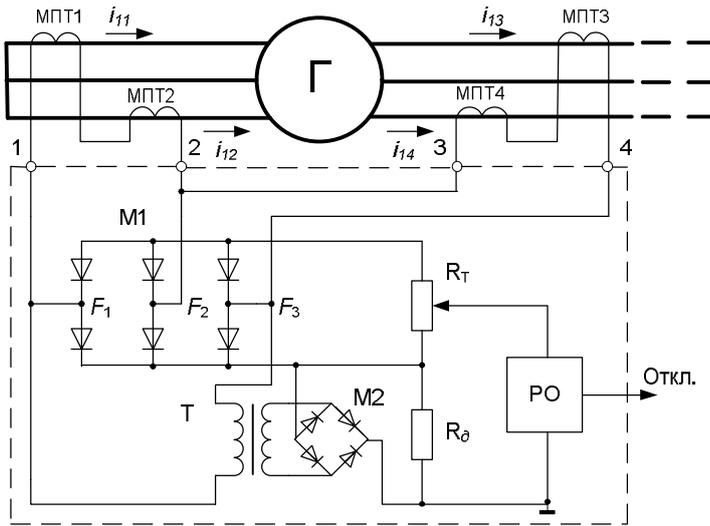


Рисунок 1 – Односистемная дифференциальная защита синхронного генератора

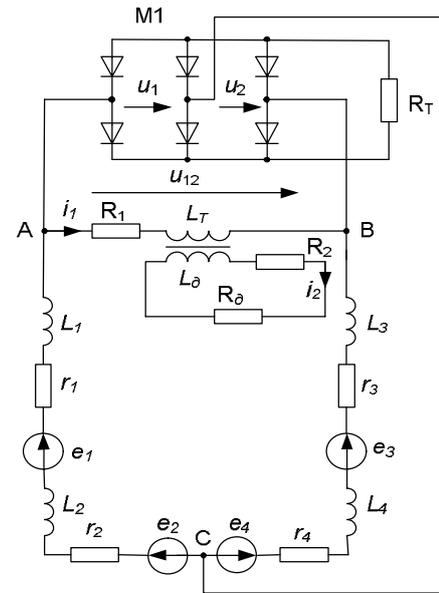


Рисунок 2 – Схема замещения измерительной части защиты

Характеристика намагничивания магнитопровода МПТ аппроксимирована выражением:

$$B = \frac{H}{\alpha + \gamma|H|},$$

где $\alpha = 65,1$; $\gamma = 0,331$ – коэффициенты аппроксимации [2].

Первичные токи с учетом условий $i_{13} = i_{11}$, $i_{14} = i_{12}$ – при КЗ в зоне защиты; $i_{13} = -i_{11}$, $i_{14} = -i_{12}$ – при КЗ вне зоны защиты, определяются следующими выражениями:

$$i_{11} = I_{1m} \left[\cos\varphi_i \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \cos(\omega t + \varphi_i) \right];$$

$$i_{12} = I_{1m} \left[\cos\varphi_i \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \cos\left(\omega t + \varphi_i - \frac{2}{3}\pi\right) \right].$$

где I_{1m} – амплитуда периодической составляющей тока КЗ; φ_i – начальная фаза первичного тока; T_1 – постоянная времени первичной цепи.

Принято также, что напряжение небаланса дифференциальной защиты в номинальном режиме работы генератора равно нулю ($u_{12} = 0$). В соответствии с этим начальные условия являются нулевыми $i_1(0) = i_2(0) = 0$.

С учетом вышеизложенного математическая модель измерительной части защиты определяется выражением (1) и уравнениями Кирхгофа, составленными для контуров с токами i_1 и i_2 схемы замещения (см. рисунок 2)

$$i_1(4r + R_1) + (4L + L_T) \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = e_1 + e_2 - e_3 - e_4, \quad (2)$$

$$i_2(R_2 + R_o) + L_o \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0,$$

где M – коэффициент взаимной индукции разделительного трансформатора;

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r; L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L.$$

Решение системы уравнений (2) было получено на ЭВМ численным методом Рунге-Кутты. Расчеты производились при следующих значениях элементов схемы замещения и параметров МПТ: число витков вторичной обмотки МПТ – $w_2 = 2760$; средняя длина и сечение его магнитопровода соответственно – $l_0 = 0,332$ м, $S = 102 \cdot 10^{-6}$ м²; активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки – $r = 40$ Ом, $L = 0,02$ Гн; активные сопротивления нагрузки дифференциальной и тормозной цепей $R_\Delta = R_T = 20$ кОм; сопротивления первичной и вторичной обмоток разделительного трансформатора $R_1 = R_2 = 100$ Ом; соответственно их индуктивности $L_T = L_\Delta = M/\kappa_{св}$; коэффициент связи разделительного трансформатора $\kappa_{св} = 1$; начальная магнитная проницаемость сердечника магнитопровода МПТ – $\mu_H = 1,5360983 \cdot 10^{-5}$ Гн/м; $T_1 = (0,01 \div 0,1)$ с; угловая частота – $\omega = 314,159$ рад/с. Принято также, что коэффициент возврата реагирующего органа (РО) защиты равен единице.

На рисунке 3 в качестве примера представлены результаты расчетов сигналов измерительной части дифференциальной защиты в виде кривых мгновенных значений в режиме внутреннего КЗ (рисунок 3 а). По полученным кривым построены временные диаграммы работы РО защиты (рисунок 3 б), срабатывание которого происходит за время 1,6 мс. смещения входного напряжения РО в нормальных эксплуатационных режимах.

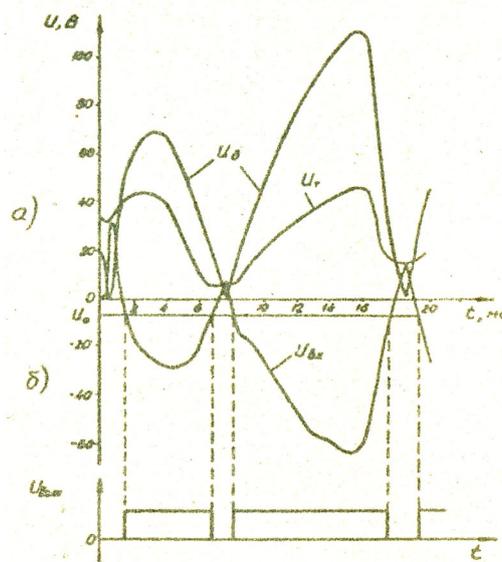


Рисунок 3 – Сигналы защиты в режиме внутреннего КЗ при $\varphi_i = 0$;

$$I_{1m} = 20 \text{ кА}; T_1 = 0,1 \text{ с}; \kappa_T = 0,4$$

а) расчетные кривые мгновенных значений дифференциального u_Δ , тормозного u_T и сигнала на входе РО $u_{вх}$;

б) диаграммы сигналов на выходе РО при начальной уставке $U_0 = -5$ В

В режиме внешнего КЗ напряжение небаланса близко к нулю при любой кратности реального первичного тока. С учетом этого торможение в схеме односистемной дифференциальной защиты необходимо для обеспечения требуемой помехоустойчивости за счет положительного

Исследование защиты с помощью математической модели показали, что при коэффициенте торможения $\kappa_T = 0,4$ обеспечивается распознавание токов КЗ, превышающих $0,5I_{ном}$, за время $(1 \div 3)$ мс.

Расчетные данные согласуются с экспериментальными данными, полученными при испытании дифференциальной защиты двухконцевых электроустановок

(синхронных генераторов, двигателей и силовых кабельных линий) на реальной электродинамической модели АЭС. Погрешность совпадения амплитудных значений сигналов с учетом визуальной обработки осциллограмм не превышала 12%. Неправильных действий дифференциальной защиты во всех режимах не наблюдалось; распознавание КЗ в минимальном режиме синхронного генератора происходило за время, не превышающее расчетное.

При обрыве соединительных линий связи МПТ1-МПТ4 с реле защита блокируется за счет разрыва дифференциальной цепи (см. рисунок 1). В этом случае она будет находиться в состоянии скрытого отказа. Автоматическая диагностика скрытого отказа может быть выполнена с помощью технического решения, описанного в [3].

Перечень ссылок

1. Темиров А.П. Разработка и создание элементов интегрированных корабельных электроэнергетических систем. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета. – 2005. – 546 с.
2. Михайлов В.В., Проус В.Р. Применение в дифференциальной защите преобразователей тока с магнитодиэлектрическими магнитопроводами // Изв. вузов – «Энергетика». 1987. – № 7. – С. 27-32.
3. Лукьянов В.Г., Проус В.Р., Цыгулев Н.И. Повышение эксплуатационных характеристик дифференциальной защиты электроустановок. – Электрические станции. – 2004. – № 4. – С. 57-61.