

Результаты дифференцирования (П. 2) представлены следующими выражениями:

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi}{\partial U'_i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l (U'_i - U'_j) g_{ij}; \\ \frac{\partial \pi}{\partial U''_i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l (U''_i - U''_j) g_{ij}. \end{cases} \quad (\text{П. 5})$$

Подставим далее выражение (П. 5) в левые части (П. 4), а значения производных $\partial P/\partial U$ и $\partial Q/\partial U$, полученные дифференцированием (П. 1), – в правые. В результате выполнения подстановки образуется полная система линейных уравнений, решение которой позволяет найти $\partial \pi/\partial P_i$ и $\partial \pi/\partial Q_i$ для всех узлов.

В матричной форме система (П. 4) имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial U'} & \frac{\partial Q}{\partial U'} \\ \frac{\partial P}{\partial U''} & \frac{\partial Q}{\partial U''} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \pi}{\partial P} \\ \frac{\partial \pi}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \pi}{\partial U'} \\ \frac{\partial \pi}{\partial U''} \end{bmatrix}. \quad (\text{П. 6})$$

Квадратная матрица частных производных в левой части (П. 6) представляет собой транспонированную матрицу Якоби, аналогичную применяемой при расчете установившихся режимов.

Система линейных уравнений (П. 6) с разреженной и структурно-симметричной матрицей Якоби решается методом оптимального исключения Гаусса с учетом динамического способа перенумерации узлов.

Представлена кафедрой
электротехники и электроники

Поступила 23.09.2003

УДК 621.318.43

УПРАВЛЯЕМЫЙ РЕАКТОР С ПОВЫШЕННЫМИ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИМИ СПОСОБНОСТЯМИ

Канд. техн. наук ПРИМА В. М., студ. РЕПИН В. Г.

Белорусский национальный технический университет

Необходимость эффективного ограничения токов коротких замыканий в энергетических системах привела к использованию конструктивных разработок реакторов с ферромагнитными сердечниками [1]. Наиболее простыми из них, удобными в изготовлении являются реакторы с магнитопроводами стержневого типа, имеющие продольное намагничивание переменным и постоянным магнитными полями. Такие реакторы способны автоматически увеличивать индуктивность в режиме коротких замыканий в четыре–пять раз по сравнению с индуктивностью нормального режима работы [2]. Это свойство позволяет реактору более эффективно, чем бетонный ректор, ограничивать токи коротких замыканий, например, в электрических сетях 6–10 кВ, выполненных кабелями, что позволит отказаться от проверки кабелей на термическую устойчивость.

В случае использования управляемых реакторов в цепях дуговых сталеплавильных печей существенное уменьшение колебаний напряжения в сетях предприятия, вызванных технологическими короткими замыканиями в печах, может быть достигнуто при более значительных кратностях увеличения их индуктивного сопротивления.

Токоограничивающие возможности управляемых реакторов можно расширить, если в момент КЗ снять с магнитопровода подмагничивание постоянным магнитным полем. Быстрое отключение, например, цепи обмоток управления при коротком замыкании не принесет ощутимых результатов. Остаточное намагничивание сердечника постоянным магнитным полем продолжает сохраняться, и эффективность такого отключения уменьшается. Поток обмоток управления в магнитопроводе реактора можно убрать при коротких замыканиях, оставив их включенными. Для этого достаточно создать в нем кратковременно аналогичный по характеру и величине магнитный поток, направленный встречно потоку обмоток управления. В результате их взаимодействия степень насыщения магнитопровода постоянным магнитным полем в режиме КЗ уменьшится. С этой целью на магнитопровод реактора были наложены дополнительные компенсирующие обмотки W_k . Схема включения обмоток W_k каждой фазы принималась аналогичной схеме включения обмоток управления W_y . Питание их осуществлялось через полупроводниковые выпрямители от небольшой части витков его рабочих обмоток. Параметры компенсирующих обмоток и ответвлений на рабочих обмотках выбирались такими, чтобы в режиме КЗ в магнитопроводе действовали два равновеликих, встречно направленных магнитных потока, обусловленных равенством их ампервитков:

$$I_y W_y = I_k W_k,$$

где I_y и W_y , I_k и W_k – токи и количества витков обмоток управления и компенсирующих обмоток на фазу.

На рис. 1 приведена электрическая схема реактора с компенсирующими обмотками, выполненного на шестистержневом магнитопроводе. Принцип его действия состоит в следующем. В нормальном режиме работы магнитопровод реактора намагничивается постоянным магнитным полем, созданным обмоткой управления. Индуктивность его рабочих обмоток, включенных последовательно с нагрузкой, уменьшается, падение напряжения на них составляет 6...8 % номинального напряжения установки.

Компенсирующие обмотки, как и обмотки управления, остаются включенными весь период работы реактора. Однако их размагничивающее действие в продолжительном режиме

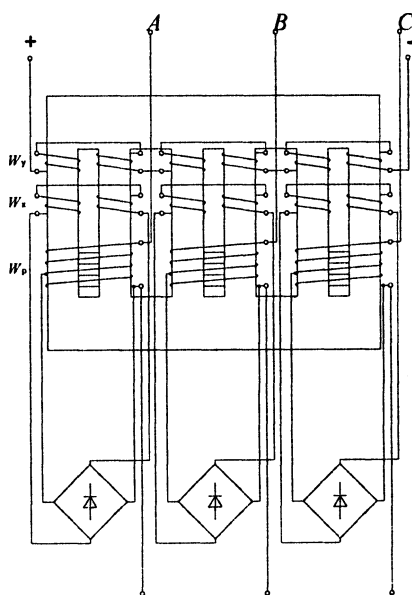


Рис. 1

работы невелико. Они подключены к небольшой части витков рабочих обмоток, напряжение на которых в нормальном режиме незначительно. Как показывают экспериментальные исследования на физической модели реактора, дополнительное увеличение ампервитков в цепи управления с включенными обмотками W_k в продолжительном режиме составляет не более 4...5 %.

При внезапном коротком замыкании в электрической сети напряжение на рабочих обмотках реактора быстро увеличивается и практически достигает полного напряжения установки. Растет соответственно напряжение на той части витков рабочих обмоток, от которых через выпрямители питаются компенсирующие обмотки. Постоянный магнитный поток, создаваемый ими в магнитопроводе, автоматически возрастает и компенсирует поток обмоток управления, так как эти потоки встречно направлены. Уменьшение степени насыщения магнитопровода постоянным магнитным полем приводит к существенному увеличению индуктивности рабочих обмоток реактора в установившемся режиме КЗ. Зависимости индуктивного сопротивления реактора от напряжения на его рабочих обмотках, а также от тока в них приведены на рис. 2 и 3 в виде семейства характеристик, полученных экспериментально на физической модели реактора, при различных значениях ампервитков цепи управления.

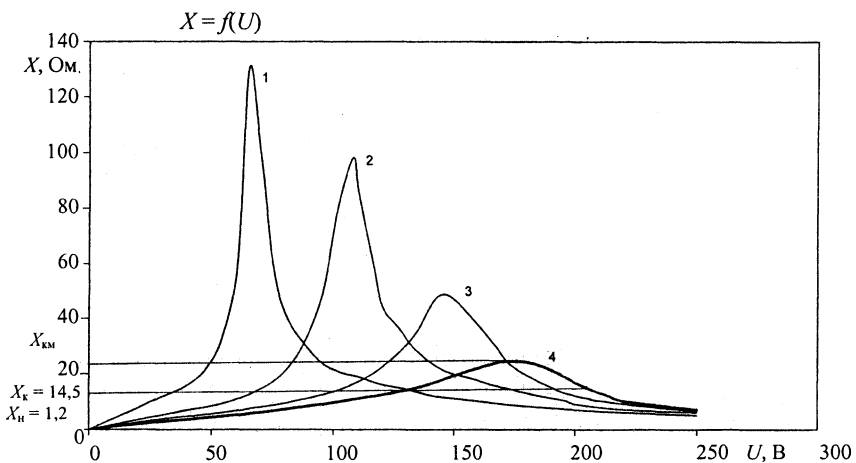


Рис. 2. Зависимость индуктивного сопротивления опытной установки управляемого реактора от напряжения на выводах рабочих обмоток при различных значениях ампервитков цепи управления: 1 – $I_y W_y = 736$; 2 – 1472; 3 – 2208; 4 – 2944

Анализ показывает, что при небольших напряжениях на рабочих обмотках реактора (начальные участки характеристик рис. 2) индуктивное сопротивление его невелико и соответствует сопротивлению нормального режима работы X_n . Дальнейшее увеличение напряжения на рабочих обмотках ведет к быстрому росту индуктивного сопротивления. Для исследуемой опытной установки реактора с номинальными параметрами: $U_{нр} = 13$ В; $I_{нр} = 10$ А; $U_{нуст} = 380$ В рабочими являются характеристики под номером 4. На восходящих участках характеристик (рис. 2) рост сопротивления реактора столь значителен, что ток в его рабочих обмотках, как видно из рис. 3, при увеличении напряжения уменьшается до некоторого зна-

чения, а затем снова продолжает расти. Индуктивное сопротивление реактора, достигнув своей максимальной величины $X_{км}$, также постепенно уменьшается. Однако при напряжении, соответствующем режиму короткого замыкания, оно остается достаточно значительным и превосходит сопротивление нормального режима для опытной установки реактора в 11...12 раз. Из рис. 3 видно, что реактор, обладающий такой кратностью сопротивления $X_{к}/X_{н}$, способен в установившемся режиме КЗ в электрической сети ограничить токи до величин, близких его рабочим токам продолжительного режима.

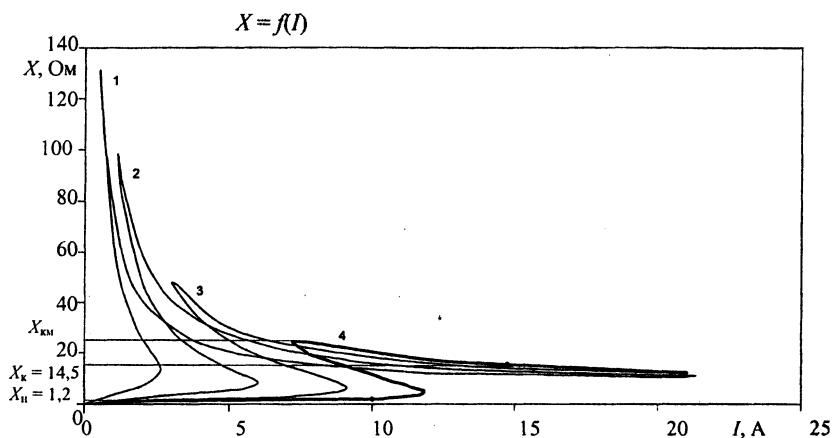


Рис. 3. Зависимость индуктивного сопротивления опытной установки управляемого реактора от тока в его рабочих обмотках при различных значениях ампервитков цепи управления: 1 – $I_y W_y = 736$; 2 – 1472; 3 – 2208; 4 – 2944

Получение максимальной кратности сопротивления $X_{км}/X_{н}$ является вполне реальным и обеспечивается соответствующими конструктивными расчетами реактора.

ВЫВОД

Наличие в управляемом реакторе компенсирующих обмоток, питающихся через выпрямители от небольшой части витков рабочих обмоток, позволяет увеличить его индуктивное сопротивление в режиме короткого замыкания в 11...12 раз по сравнению с сопротивлением продолжительного режима работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неклепаев Б. Н. Методы ограничения токов коротких замыканий в энергосистемах // Электрические станции. – 1973. – № 11.
2. П р и м а В. М. Токоограничивающий управляемый реактор // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1966. – № 11.

Представлена кафедрой
электрообеспечения

Поступила 23.09.2003