

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ДВЕНАДЦАТИФАЗНОГО КОМПЕНСИРОВАННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

В.И. Сафонов, К.А. Джакупова

Предложена методика адаптации математической модели 12-ти фазного компенсированного выпрямителя с коммутацией в конденсаторы 5-ой и 7-ой гармоник для выполнения инженерных расчетов. Получены аппроксимационные формулы для анализа качества выпрямленного напряжения, качества электроэнергии в сети и выбора параметров элементов выпрямителя. Предложенная методика позволяет детализировать математическую модель введением дополнительных функций и дополнительных параметров.

Ключевые слова: 12-и фазный компенсированный выпрямитель, аппроксимационные функции.

Введение

Использование компенсированных выпрямителей с фильтрацией в конденсаторы 5-ой и 7-ой гармоник [1] позволяет осуществлять компенсацию реактивной мощности наиболее эффективно по сравнению с другими вариантами компенсированных выпрямителей.

Теоретическое исследование указанного 12-и фазного компенсированного выпрямителя выполнено [1] в предположениях, характерных для мощных выпрямителей [2], когда индуктивное сопротивление контура коммутации много больше активного сопротивления. В общем случае характеристики выпрямителя являются сложными функциями. Область применения зависимостей ограничивается основным режимом работы выпрямителя. Рабочий диапазон токов выпрямителя, как правило, не выходит за границы основного режима и не превышает 10 % от тока короткого замыкания. С учетом этих ограничений теоретически полученные характеристики выпрямителя могут быть аппроксимированы более удобными для практического использования функциями.

Конечным результатом анализа электромагнитных процессов в выпрямителе являются оценка качества выпрямленного напряжения, влияние выпрямителя на качество электрической энергии в сети и выбор параметров элементов выпрямителя. Качество выпрямленного напряжения определяется жесткостью внешней характеристики выпрямителя. Качество электроэнергии в сети определяется коэффициентом несинусоидальности напряжения в точке подключения выпрямителя, а также потребляемой им реактивной мощностью. Наиболее сложным является выбор конденсаторов компенсирующего устройства, работающих в несинусоидальном режиме. Поэтому для построения упрощенной модели выпрямителя авторы ограничились получением простых функций для указанных выше зависимостей.

Материалы и методы исследования

Математическая модель компенсированного выпрямителя сформирована [1, 3] в относительных единицах. Базисный ток равен току короткого замыкания, базисное напряжение – выпрямленному напряжению в режиме холостого хода. Все процессы в выпрямителе определяются параметром $\nu = X_C / X_k$, где X_k – сопротивление контура коммутации, X_C – сопротивление конденсаторной батареи для $f = 50$ Гц.

Порядок получения упрощенной функциональной зависимости рассмотрим на примере зависимости реактивной мощности. Сначала при заданном значении параметра ν выбираем вид аппроксимационной функции $Q_e(I_d) = AI_d + BI_d^2$. Коэффициенты A и B в функции вычисляем методом наименьших квадратов, используя набор значений выпрямленных токов из рабочего диапазона выпрямителя и соответствующие им точные значения [3] реактивной мощности. Правильность выбора аппроксимационной функции подтверждалось расчетом коэффициента корреляции, значение которого по модулю было близко к единице.

Выполнив указанный расчет для всего диапазона параметров ν от 0 до 6 для неизменного вида аппроксимационной функции $Q_e(I_d) = AI_d + BI_d^2$, по-

лучаем зависимости коэффициентов $A(\nu)$ и $B(\nu)$. Для этих зависимостей выбираем функции $A(\nu) = A_1 + B_1\nu^2$ и $B(\nu) = A_2 + B_2\nu^2 + C_2\nu^4$. Коэффициенты в них также вычисляем методом наименьших квадратов. Правильность выбора функций подтверждалась расчетом коэффициента корреляции.

Результаты и их обсуждение

В результате для реактивной мощности получается следующая аппроксимационная функция:

$$Q_e(I_d, \nu) = (0.128 - 1.508 \cdot 10^{-3} \nu^2) I_d + (2.969 - 0.069 \nu^2 - 9.197 \cdot 10^{-4} \nu^4) I_d^2. \quad (1)$$

На рис. 1 показаны зависимости реактивной мощности от выпрямленного тока, построенные по точным зависимостям (точки) и по аппроксимационной формуле (линии). Из рис. 1 можно сделать вывод, что полученная зависимость достаточно точна и в рассматриваемом диапазоне может заменить точную функцию реактивной мощности. Предложенный алгоритм статистической обработки данных математической модели дает хороший результат. Наибольшую сложность в этом алгоритме представляет выбор простых и одновременно точных функций аппроксимации.

Для некомпенсированного выпрямителя $\nu = 0$ функция внешней характеристики имеет вид $U_d(I_d) = U_{d0} - XI_d$. В этом случае система электропитания относительно нагрузки заменяется [2] эквивалентным генератором с э.д.с. U_{d0} и внутренним сопротивлением X . Поэтому для внешней характеристики некомпенсированного выпрямителя была выбрана аппроксимационная функция вида:

$$U_d(I_d, \nu) = U_{d0}(\nu) - X(\nu)I_d. \quad (2)$$

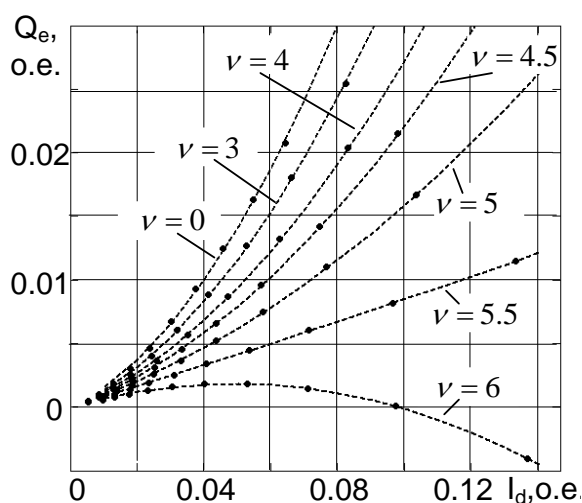


Рис. 1. Зависимость реактивной мощности

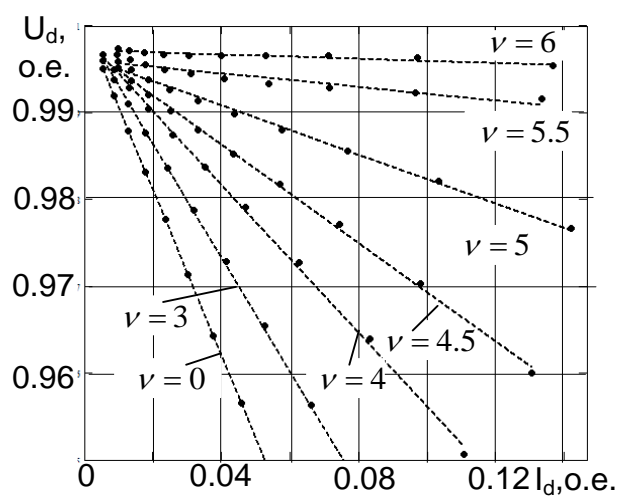


Рис. 2. Внешняя характеристика выпрямителя

На рис. 2 построены точные значение [1,3] внешней характеристики (точки) и результаты, полученные по аппроксимационной формуле (линии). Расчеты коэффициентов корреляции и построения на рис. 2 показывают, что для всего диапазона токов, кроме $I_d < 0.02$, и всего диапазона параметров ν от 0 до 6 выбранная функция правильно аппроксимирует данные математической модели. Для компенсированного выпрямителя система электроснабжения также может быть заменена относительно нагрузки эквивалентным генератором с э.д.с. $U_{d0}(\nu)$ и внутренним сопротивлением $X(\nu)$. Аппроксимационная зависимость для сопротивления генератора $X(\nu) = 0.096 - 3.292 \cdot 10^{-3} \nu^2$ при $\nu < 5$ и $X(\nu) = 0.725 - 0.25 \cdot \nu + 0.021 \nu^2$ при $5 < \nu < 6$. Аппроксимационная зависимость для э.д.с генератора $U_{d0}(\nu) = 1$ при $\nu < 2$ и $U_{d0}(\nu) = 1.001 - 1.526 \cdot 10^{-4} \nu^2$ при $2 < \nu < 6$.

Влияние активного сопротивления силового трансформатора и сети на внешнюю характеристику некомпенсированного выпрямителя в [2] учитывалось путем добавления активного сопротивления к внутреннему сопротивлению эквивалентного генератора. Аналогичную аппроксимационную формулу можно использовать и для некомпенсированного выпрямителя.

Для коэффициента несинусоидальности напряжения в точке подключения выпрямителя была получена аппроксимационная формула вида:

$$K_n(I_d, \nu) = ((-3.563 - 0.168\nu + 0.053\nu^2)I_d + (3.242 + 0.122\nu - 0.033\nu^2)I_d^{0.9})X_s, \quad (3)$$

где X_s – индуктивное сопротивление сети. Сравнение точных [1,3] и приближенных расчетов показывает, что аппроксимация дает хорошие результаты, кроме малых значений токов $I_d < 0.02$. Формулой (3) можно пользоваться, если выпрямитель является основным генератором высших гармоник среди нагрузок, подключенных к секции шин.

В компенсирующем устройстве выбор номинального напряжения конденсаторной батареи, работающей в основном на 5-ой и 7-ой гармониках, по номинальному напряжению на основной гармонике осуществляется с учетом следующих условий [1]. Номинальное напряжение батареи должно быть больше расчетного действующего значения напряжения конденсатора. Номинальные потери в диэлектрике должны быть больше расчетных потерь. Номинальный ток конденсатора должен быть больше расчетного тока.

Каждое из этих условий позволяет пересчитать номинальное напряжение для конденсаторной батареи, умножая паспортное значение напряжения на коэффициент, зависящий от тока выпрямителя I_d и параметра ν . Из трех полученных значений необходимо выбрать наименьшее. Анализ зависимостей для трех условий показывает, что при всех значениях тока I_d и параметра ν определяющим является первое условие. Для этого условия получена аппроксимационная формула вида:

$$K(I_d, \nu) = 0.724 + (0.163 - 0.216\nu)I_d + (0.694 + 0.043\nu - 3.815 \cdot 10^{-3} \nu^2) \sqrt{I_d}. \quad (4)$$

Таким образом, для определения номинального напряжения конденсаторной батареи, работающей на 5-ой и 7-ой гармониках, необходимо умножить паспортное значение напряжения при $f = 50$ Гц на коэффициент (4).

Рассмотренный вариант математической модели выпрямителя позволяет проще выполнять расчеты наиболее важных величин, характеризующих 12-ти фазный компенсированный выпрямитель. Также в упрощенную модель можно добавлять дополнительные параметры, например, активное сопротивление сети и обмоток силового трансформатора, отсутствующие в исходной математической модели. В этом случае исходные данные можно получать путем имитационного моделирования выпрямителя в Matlab Simulink. Конечные результаты анализа будут иметь вид аналитических функций, коэффициенты в которых рассчитаны численно. Применение предложенной методики также может быть полезно для получения аналитических результатов в более сложных моделях выпрямителя. Например, при исследовании совместной модели выпрямителя и активного или пассивного фильтра.

Выводы

1. Предложена методика адаптации математической модели 12-ти фазного компенсированного выпрямителя с коммутацией в конденсаторы 5-ой и 7-ой гармоник для выполнения инженерных расчетов.
2. Получены аппроксимационные формулы для расчета: реактивной мощности и коэффициента несинусоидальности в точке подключения выпрямителя; напряжения нагрузки; напряжения конденсаторной батареи.
3. Предложенная методика позволяет детализировать математическую модель введением дополнительных функций и параметров.

Библиографический список

1. Хохлов, Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков / Ю.И. Хохлов. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 355 с.
2. Фишлер, Я.Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я.Л. Фишлер, Р.И. Урманов, Л.М. Пестряева. – М.: Энергоиздат, 1989. – 320 с.
3. Хохлов, Ю.И. Внешние и энергетические характеристики двенадцати фазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, П.В. Лонзингер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 37–45.

[К содержанию](#)