

ПОСТРОЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТЯГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Д.А. Кулагин, П.Д. Андриенко

*(Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье,
Украина)*

В качестве силовых ключей для тягового преобразователя частоты используются различные типы транзисторов, на основе IGBT, IGCT или GTO. Схема преобразователя частоты (ПЧ), которая получила широкое практическое использование в тяговых передачах переменного тока [2], выполняется на IGBT силовых ключах. Опыт использования данных типов ПЧ [3] показывает, что при построении схемы тягового автономного инвертора напряжения (ТАИН) на основе IGBT достигается ряд преимуществ в сравнении с другими видами схем:

- способность к управляемому запираанию;
- высокая рабочая частота;
- простая система управления с малым собственным потреблением мощности.

Современные быстродействующие силовые ключи на основе IGBT, IGCT, GTO, которые используются при создании статических преобразователей частоты тяговых ПЧ, наиболее приближены к идеальным ключам лишь в части:

- относительно малых значений времен задержки (фронта, среза) их переключения в сравнении с фактическими временными протяженностями управляющего и непроводящего состояний указанных ключей при широтно-импульсной модуляции;

- вследствие малости токов, которые протекают через закрытые ключи, в сравнении с рабочими значениями токов через них в открытом состоянии.

ТАИН подключается к шине постоянного тока ПЧ, которая шунтирована конденсаторным фильтром. Наличие данного фильтра, который предназначен

для компенсации реактивной мощности нагрузки, является характерной особенностью данной схемы [1]. Параллельно с блоком фильтра включается тормозной резистор, который управляется тормозным запираемым тиристором.

Стандартная схема ТАИН состоит из шести транзисторов, шунтированных диодами для достижения двусторонней проводимости тока активно-индуктивной нагрузки, которой является тяговый асинхронный двигатель (ТАД). Преобразование постоянного напряжения в трехфазную переменную систему осуществляется коммутацией транзисторов, которые работают в определенной последовательности. В каждый момент времени открыты одновременно три транзистора в каждой из фаз ТАИН, а другие закрыты [1]. Включение транзисторов осуществляется подачей управляющего импульса на базу транзистора от системы управления моторизованным звеном поезда. В отличие от тиристорного инвертора, где выходное напряжение имеет ступенчатую форму с продолжительностью каждой ступени $1/6$ периода выходного напряжения, характеристики транзисторов позволяют получать на выходе ТАИН переменное напряжение почти синусоидальной формы, частота которого регулируется изменением частоты подачи импульсов (коэффициента модуляции) на ключе тягового ПЧ. При питании ТАД от трехфазного ТАИН максимальное количество комбинаций, различающихся между собой, значений фазных статорных напряжений и соответствующих различающихся значений обобщенных векторов статорных напряжений ТАД равняется семи.

Приведем векторную диаграмму в неподвижной относительно статора ТАД полярной системе координат с осью отсчета α относительно магнитной оси статорной обмотки фазы А ТАД для значений соответствующих комбинаций обобщенного вектора фазного статорного напряжения (рис. 1).

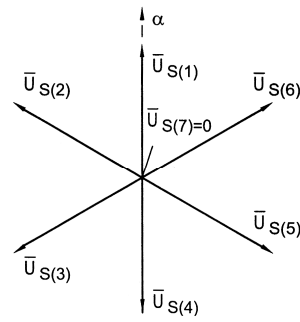


Рис. 1. Векторная диаграмма значений комбинаций обобщенного вектора фазного статорного напряжения ТАД

Закон управления ключами тягового ПЧ определяет ряд важных как входных, так и выходных параметров преобразования электрической энергии, в частности, качество выходного напряжения ТАИН. При этом доминирующее значение имеет не только фактор обеспечения высокого коэффициента полезного действия, качественного гармонического состава сформированного выходного напряжения для питания ТАД, но и последовательность работы в целом ТАИН как звена замкнутой системы автоматического управления.

Для реализации системы управления ПЧ запишем ключевую переключающую функцию. Ключевая переключающая функция F_i равняется 1, если i -й ключ проводит ток и $F_i = 0$, если i -й ключ ПЧ не проводит ток.

При анализе считаем источник питания ТАИН и ключи идеальными, пренебрегаем интервалом «мертвой» паузы. Тогда при работе на нагрузку с активно-индуктивным характером и при изолированной нейтральной точке ТАИН симплексный способ переключения силовых ключей ПЧ должен отвечать следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
 U_{AB} &= \begin{cases} \pm U_d, \text{ если } F_1 \cdot F_4 \vee F_2 \cdot F_3 = 1; \\ 0, \text{ если } F_1 \cdot F_3 = 1 \text{ или } F_2 \cdot F_4 = 1; \end{cases} \\
 U_{BC} &= \begin{cases} \pm U_d, \text{ если } F_3 \cdot F_6 \vee F_4 \cdot F_5 = 1; \\ 0, \text{ если } F_3 \cdot F_5 = 1 \text{ или } F_4 \cdot F_6 = 1; \end{cases} \\
 U_{CA} &= \begin{cases} \pm U_d, \text{ если } F_5 \cdot F_2 \vee F_6 \cdot F_1 = 1; \\ 0, \text{ если } F_1 \cdot F_5 = 1 \text{ или } F_2 \cdot F_6 = 1, \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} - фазные напряжения ТАД;

U_d - напряжение звена постоянного тока тягового ПЧ.

В процессе работы недопустимо состояние ключей, при котором

$$F_1 \cdot F_2 = F_3 \cdot F_4 = F_5 \cdot F_6 = 1. \quad (2)$$

В выражениях (1) знаком « \vee » обозначена операция дизъюнкции (логическое добавление).

Расширенное описание метода управления ключами по закону (1) может обеспечивать параллельное подключение двух фаз работающего ТАД последовательно третьей. Две других фазы ТАД меняют состояние по отношению только к шинам питания ТАИН, то есть

$$\begin{aligned} U_{AB} &= \begin{cases} \pm U_d, \text{ если } F_1 \cdot F_4 \cdot F_5 \vee F_2 \cdot F_3 \cdot F_6 = 1; \\ 0, \text{ если } F_1 \cdot F_5 = 1, F_4 = 0 \text{ или } F_1 \cdot F_5 = 0, F_4 = 1; \end{cases} \\ U_{BC} &= \begin{cases} \pm U_d, \text{ если } F_3 \cdot F_5 \cdot F_2 \vee F_4 \cdot F_1 \cdot F_6 = 1; \\ 0, \text{ если } F_3 \cdot F_5 = 1, F_2 = 0 \text{ или } F_3 \cdot F_5 = 0, F_2 = 1; \end{cases} \\ U_{CA} &= \begin{cases} \pm U_d, \text{ если } F_5 \cdot F_2 \cdot F_4 \vee F_6 \cdot F_1 \cdot F_3 = 1; \\ 0, \text{ если } F_4 \cdot F_2 = 1, F_5 = 0 \text{ или } F_2 \cdot F_4 = 0, F_5 = 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Для построения общей топологической модели ПЧ дополним разработанные математические отношения общими уравнениями для звена постоянного тока:

$$\begin{cases} u_U = \frac{1}{k_{ВП}} (1 + T_\mu p) e_d; \\ e_d = R_d (1 + T_d p) i_d + u_C; \\ i_d = i_C + i_U; \\ i_C = X_C p u_C; \\ u_U = k_U u_s; \\ i_U = \frac{3}{2} k_U i_{sx}, \end{cases} \quad (4)$$

где $k_{ВП}$ – коэффициент передачи ПЧ по напряжению;

k_u – модуль коммутационной функции ТАИН;

T_{μ} – постоянная времени выпрямителя;

T_d – постоянная времени блока фильтров;

e_d – ЭДС звена постоянного тока;

R_d – активное сопротивление фильтра звена постоянного тока;

X_C – емкостное сопротивление фильтра звена постоянного тока;

u_s – модуль статорного напряжения ТАД;

u_c – напряжение на конденсаторе фильтра ТАИН;

i_c – ток, протекающий через конденсатор фильтра ТАИН;

u_u – напряжение ТАИН;

i_u – ток ТАИН;

p – оператор Лапласа.

Таким образом получена общая топологическая структура тягового ПЧ переменного тока, пригодная для использования в автономных и не автономных единицах подвижного состава железных дорог. На основании данной структуры возможно построение модели тяговой электропередачи и системы автоведения подвижного состава.

Библиографический список

1. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Пивняк Г. Г., Волков А. В. – Днепропетровск, 2006. – 421 С.

2. Лазарев Г. Л. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости электротехники. – 2005. – № 2(32). – С. 23–40.

3. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives / B. K. Bose. – Prentice Hall, 2002. – 712 P.