

УДК 621.314

УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ СО СТОРОНЫ НАГРУЗКИ

Якупов Д.В., ассист., Казачковский Н.Н., к.т.н., доц.

Национальный горный университет

пр. К. Маркса, 19, 49005, г. Днепропетровск, Украина

Предложен способ определения уровня токоограничения регулятора напряжения активного выпрямителя, основанный на расчете динамических режимов.

Ключевые слова: активный выпрямитель, управление при возмущении, переходная функция, уровень токоограничения.

Введение. В последнее время вышел ряд публикаций, посвященных исследованию активного выпрямителя (АВ) как элемента системы активный выпрямитель – преобразователь частоты – двигатель [1-3]. В работе [1] активный выпрямитель рассмотрен как согласующий элемент между питающей сетью и системой ПЧ – двигатель. Была предложена система регулирования с релейно-векторным контуром тока, построенная по принципу подчиненного регулирования координат, и синтезирован регулятор напряжения (рис. 1).

В работе [2] внимание уделено разработке алгоритма релейно-векторного регулятора тока с учетом дискретности цифровой системы регулирования. В [3] рассмотрена работа АВ при провалах и перепадах напряжения питающей сети. Данная работа является продолжением проведенных выше исследований и посвящена рассмотрению взаимодействия системы АВ – ПЧ – двигатель при работе двигателя в частых пускотормозных режимах.

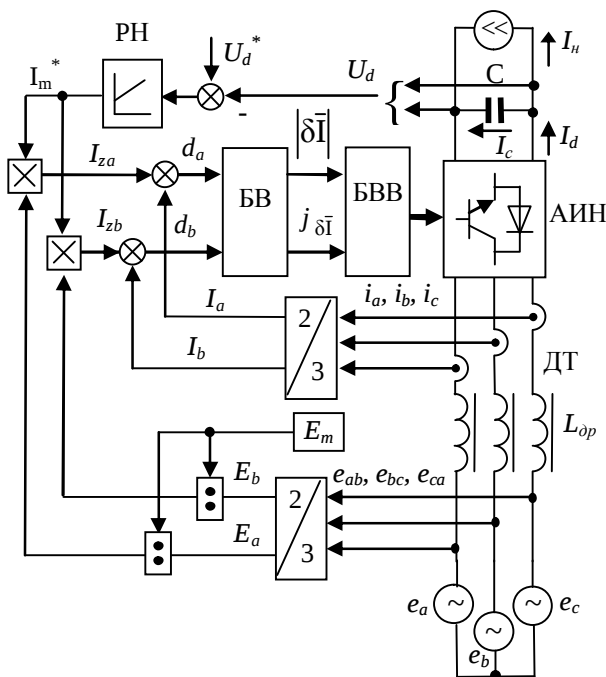


Рисунок 1 – Активный выпрямитель

Автономный инвертор напряжения (АИН) на полностью управляемых ключах (IGBT, MOSFET, GTO) подключается к сети переменного тока с фазными ЭДС e_a, e_b, e_c через дроссели $L_{\partial p}$. Для качествен-

ного регулирования напряжения U_d на конденсаторе необходимо обеспечить стабильный ток заряда/разряда конденсатора. Это значит, что активный выпрямитель должен работать в режиме источника тока, что возможно при охвате его отрицательной обратной связью по току. При этом, для обеспечения управляемости ключей, напряжение в звене постоянного тока U_d должно быть больше амплитудного значения линейного напряжения сети $U_d > U_{lm}$. Для повышения быстродействия системы регулирования используется релейный векторный алгоритм управления током.

Контур регулирования напряжения. Для определения передаточной функции регулятора напряжения передаточную функцию свернутого контура тока представим в виде:

$$W_{PT}(p) = \frac{1/k_m}{2T_m p + 1},$$

где T_m – малая некомпенсируемая постоянная времени, которая включает в себя мертвое время ключей инвертора, вычислительные задержки, период дискретизации системы регулирования, инерционности в канале измерения тока. При расчетах принималась равной $T_m = 0,0005$ с.

Структурная схема контура напряжения представлена на рис. 2. Регулятор напряжения $W_{PH}(p)$ формирует задание на амплитуду вектора тока сети (или амплитуду фазного тока I_{mf}), а регулятор $W_{PH}^*(p)$ – на величину тока I_d . Соотношение между током I_d и амплитудным значением фазного тока инвертора I_{mf} найдем из уравнения баланса мощности:

$$U_d I_d = 3E_{\phi} I_{\phi} = \frac{3}{2} E_{mf} I_{mf}; \quad (1)$$

$$I_d = \frac{3E_{mf} I_{mf}}{2U_d}, \quad (2)$$

где E_{ϕ} и I_{ϕ} – действующие значения ЭДС и тока фазы сети; E_{mf} и I_{mf} – амплитудные значения ЭДС и тока фазы сети.

Возмущающим воздействием в данной системе является ток инвертора двигателя I_n . Сделав допущение о постоянстве амплитуды фазной ЭДС сети и напряжения в звене постоянного тока при настройке

регулятора напруги на симетричний оптимум, отримав наступну передаточну функцію регулятора напруги:

$$W_{PH}^*(p) = \frac{k_m C (8T_m p + 1)}{32T_m^2 k_H p};$$

$$W_{PH}(p) = \frac{k_m C (8T_m p + 1)}{32T_m^2 k_H p} \frac{2U_d}{3E_{mf}}.$$

Як видно з рис. 2 і передаточної функції $W_{PH}(p)$, коефіцієнти регулятора залежать від величин возмущень, якими являються змінення амплітуди мережної ЕДС E_{mf} і струму навантаження I_n (і, як наслідок, U_d). Це означає, що для якісної стабілізації напруги ланки постійного струму регулятор напруги повинен бути адаптивним.

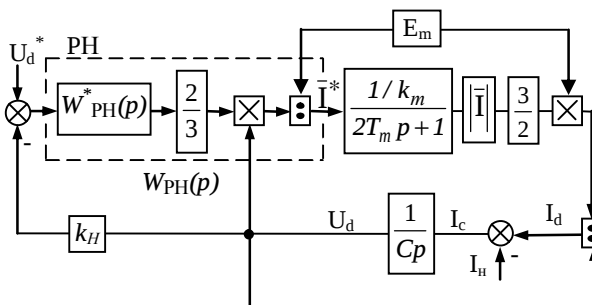


Рисунок 2 – Контур регулювання напруги

Цель работы. Данная работа посвящена рассмотрению влияния на работу регулятора напряжения изменений тока нагрузки и определению уровня токоограничения (ТО) регулятора напряжения $W_{PH}(p)$.

Материал и результаты исследований. Рассмотрим следующий режим работы: работа двигателя и двигательного инвертора в режиме двигателя с максимальным током и последующим переходом в тормозной (инверторный) режим с максимально допустимым током, равным двум номинальным.

В системе управления АВ присутствует два ТО. Одно U_{od} стоит на выходе $W_{PH}^*(p)$ и пропорционально максимальному значению тока I_n , а второе – U_{of} на выходе $W_{PH}(p)$ и ограничивает максимальное значение фазного тока сети. Это последнее ограничение будет влиять на величину мощности АВ.

Изобразим упрощенную схему работы звена постоянного тока в данном режиме (рис. 3). Работу в этом режиме можно разделить на три этапа:

- оба инвертора работают в двигательном режиме (рис. 3, а);
- инвертор нагрузки работает в режиме рекуперации, а инвертор сети – в режиме двигателя (рис. 3, б);
- оба инвертора работают в режиме рекуперации (рис. 3, в).

Для контура напруги мережного инвертора ток навантаження I_n являється возмущением. Будем считать,

что ток нагрузки меняется скачком. Учитывая, что быстродействие контура напруги АВ значительно меньше, чем контура тока, ток I_d изменит свое направление с задержкой. В результате происходит переход от этапа рис. 3, а к этапу рис. 3, б, когда оба инвертора работают на заряд конденсатора. Напряжение на конденсаторе повышается, регулятор напруги насыщается и формирует задание на максимально возможный ток сетевого инвертора обратного знака. Происходит переход от этапа рис. 3, б к этапу рис. 3, в. Если U_{of} зафиксировать на уровне, рассчитанном согласно (2) для номинального напруги U_d и максимального тока I_n , то во время переходного процесса при росте U_d ток I_d будет уменьшаться. Если ток I_d не достигнет значения I_n , рост напруги на емкости не прекратится ($I_c = I_d - I_n \neq 0$) и возникнет аварийная ситуация.

Поэтому уровень ТО U_{of} необходимо выбирать с учетом возможных динамических режимов работы АВ и нагрузки. Чрезмерное завышение уровня токоограничения приведет к завышению мощности силовых ключей.

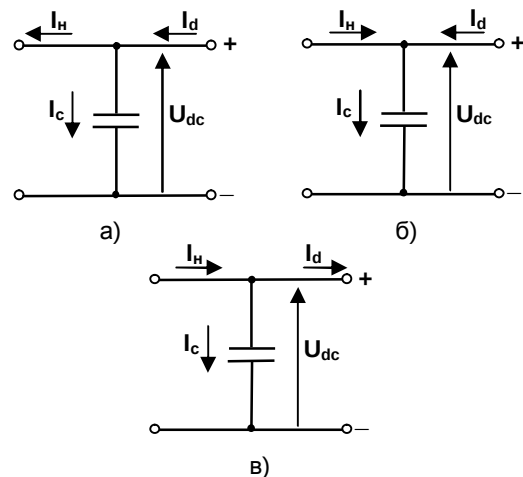


Рисунок 3 – Работа звена постоянного тока

На величину ТО могут оказывать влияние следующие факторы:

- величина емкости звена постоянного тока;
- быстродействие контура тока сетевого инвертора (уменьшение T_μ);
- введение положительной обратной связи по току нагрузки на вход контура тока.

При этом каждый из вариантов имеет свои ограничения. Увеличение емкости чревато повышением габаритов устройства. Учитывая, что ток нагрузки по цепи постоянного тока носит импульсный характер и необходимо отслеживать переход тока от одного знака к другому, для повышения скорости реакции системы нужны дополнительные способы выделения постоянной составляющей.

Для расчета уровня ТО выполним анализ процессов по средним значениям и определим соотношение между величиной ограничения тока и емкостью звена постоянного тока при фиксированном быстродействии контура тока АВ. Представим

структурную схему системы управления сетевым инвертором (рис. 4) по «возмущению». При этом будем считать систему линейной - регулятор напряжения не ограничен и адаптирован к изменениям напряжения сети и звена постоянного тока.

Передаточная функция свернутого контура имеет вид:

$$W_I(p) = \frac{I_d(p)}{I_n(p)} = \frac{8T_m p + 1}{64T_m^3 p^3 + 32T_m^2 p^2 + 8T_m p + 1}.$$

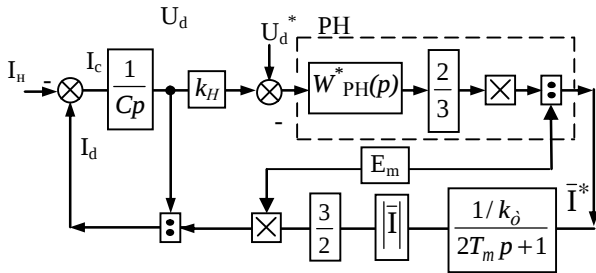


Рисунок 4 – Система управления напряжением по «возмущению»

Как можно видеть, свойства передаточной функции определяются только малой постоянной времени T_m . Решение характеристического уравнения передаточной функции приводит к получению реакции системы на единичный скачок вида:

$$H_I(p) = D_1 \frac{1}{p} \frac{p + d}{(p - b)[(p - a)^2 + w^2]},$$

где $D_1 = \frac{8T_m}{D} = \frac{8T_m}{64T_m^3}$, $d = \frac{1}{8T_m}$, a , b , w – корни характеристического уравнения.

В соответствии с [4] переходная функция, соответствующая приведенной выше передаточной функции, равна:

$$h_I(t) = D_1 \times [Ae^{at} \sin(wt + a) + Be^{bt} + K],$$

где

$$A = \frac{1}{w\sqrt{a^2 + w^2}} \sqrt{\frac{(d + a)^2 + w^2}{(a - b)^2 + w^2}};$$

$$B = \frac{b + d}{b[(b - a)^2 + w^2]};$$

$$K = \frac{-d}{b(a^2 + w^2)};$$

$$a = \arctg \frac{w}{a + d} - \arctg \frac{w}{a - b} - \arctg \frac{w}{a}.$$

График переходной функции показан на рис. 5. Функция имеет следующие показатели качества: время первого согласования - $t_1 = 6,2 \cdot T_m$, время регулирования (коридор 5%) - $t_p = 32,476 \cdot T_m$, макси-

мальное значение функции - $K_{max} = 1,434$, время достижения максимума - $t_{max} = 11,55 \cdot T_m$.

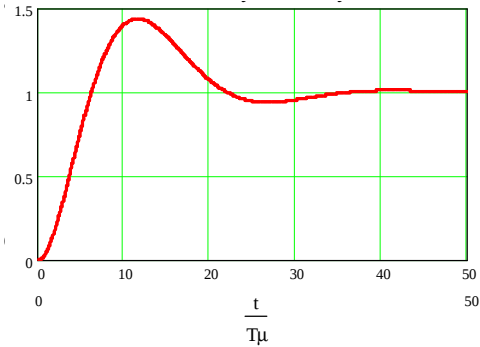


Рисунок 5 – Переходная функция

Реакция рассматриваемой системы на скачок изменения тока нагрузки I_n от отрицательного максимального значения до положительного максимального (уровни ограничения в о.е.) показана на рис. 6. В общем случае реакцию системы можно описать следующим выражением:

$$I_d = (I_n + I_{огр})h_I(t) - I_n,$$

где I_d - постоянный ток АВ, I_n - максимальный постоянный ток нагрузки, $I_{огр}$ - максимальный постоянный ток АВ.

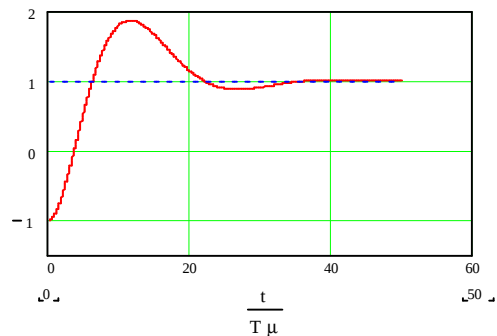


Рисунок 6 – Реакция на скачок тока нагрузки

Определим величину задания на амплитуду тока сети. Данная величина будет являться минимальной величиной ТО регулятора $W_{PH}(p)$. Для этого необходимо определить уровень U_d в конце процесса заряда:

$$U_d = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} (I_i - I_d) dt + U_{d0} = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} [2I_i - (I_i + I_{i\ddot{\alpha}})h_I(t)] dt + U_{d0}, \quad (3)$$

где U_{d0} - начальный уровень напряжения на конденсаторе, t_1 - время первого согласования.

Как видно из (1) и (3), фактором, определяющим уровень ТО амплитуды фазного тока сети, является величина емкости. Чем больше емкость, тем меньше амплитуда. В свою очередь уровень ТО влияет на

выбор номиналов силовых модулей. Для проверки предложенных зависимостей проводилось математическое моделирование в MATLAB. Модель формировалась в соответствии с рис. 4. Параметры модели: $T_m = 0,0005$ с, $k_m = k_H = 1$, $U_{d0} = 120$ В, $E_{mf} = 69,4$ В, $I_H = 20$ А. Результаты расчетов и моделирования для различных значений емкости приведены в таблице и на рис. 7.

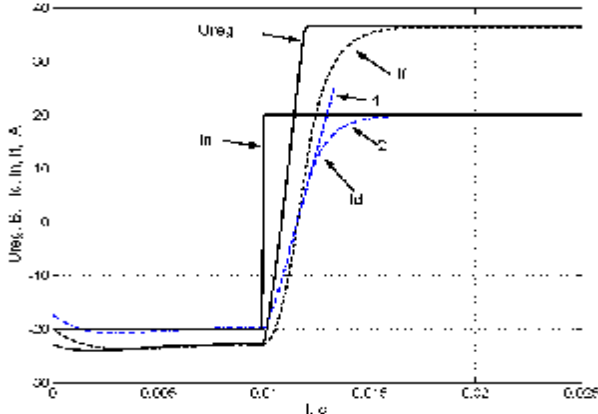


Рисунок 7 – Результати моделювання

При определении U_d сделаем допущение о том, что ток при наличии ТО меняется согласно функции $h_I(t)$ (кривая 1, рис. 7) и время достижения величины I_H равно времени первого согласования. Фактически же после вхождения регулятора в насыщение ток меняется по аperiodическому закону (кривая 2, рис. 7). Это приведет к тому, что расчетный уровень напряжения будет несколько меньше фактического и позволит решать линейную задачу.

Как видно из таблицы, результаты расчетов и моделирования отличаются не более чем на 12-15 %. Это говорит о том, что при расчетах необходимо более точно учитывать кривую изменения тока и решать нелинейную задачу с насыщением регулятора.

Таблица 1 – Результаты исследования

Величина емкости С, мкФ	Расчетный уровень перенапряжения, В	Фактический уровень перенапряжения, В	Расчетный уровень ТО, А	Фактический уровень ТО, А	Расчетный коэффициент соотношения	Фактический коэффициент соотношения
100	705	770	135,4	150	6,75	7,5
500	237	252	45,5	51,7	2,28	2,59
1000	178,5	186	34,2	38,2	1,71	1,91

Выводы. Предложен способ расчета уровня токоограничения регулятора напряжения системы регулирования АВ. Уровень токоограничения зависит от величины емкости конденсатора звена постоянного тока АВ, быстродействия контура тока АВ и динамических режимов нагрузки АВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казачковский Н. Н. Управление активным выпрямителем с релейно-векторным контуром тока для систем частотно-регулируемого электропривода / Н.Н. Казачковский., Д.В. Якупов // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Вип. 18. – Ч. 2. – Маріуполь, 2008. – С. 40-43.
2. Якупов Д. В. Релейно-векторный регулятор тока активных выпрямителей систем частотно-регулируемого электропривода / Якупов Д. В. // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". – Харків: НТУ "ХПИ", 2008, № 30. – С. 464-467.
3. Якупов Д. В. Исследование работы регулятора напряжения активного выпрямителя частотно-регулируемого электропривода / Якупов Д. В. // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2008. - №80. – С. 180-185.
4. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Корн Г., Корн Т. М., 1970, 720 с.

Статья поступила 23.03.10 г.
Рекомендована к печати д.т.н., проф.
Черным А.П.

КЕРУВАННЯ АКТИВНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ З ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ПРИ ЗБУРЕННЯХ ЗІ СТОРОНИ НАВАНТАЖЕННЯ

Якупов Д.В., асист., Казачковський М.М., к.т.н., доц.
Національний гірничий університет
пр. К. Маркса, 19, 49005, м. Дніпропетровськ, Україна

Запропоновано спосіб визначення рівня струмообмеження регулятора напруги активного випрямляча, оснований на розрахунку динамічних режимів.

Ключові слова: активний випрямляч, керування при збуренні, перехідна функція, рівень струмообмеження.

CONTROL PRINCIPLES FOR PWM-BASED ACTIVE RECTIFIER UNDER PERTURBATIONS FROM THE LOAD

Yakupov D.V., assist., Kazachkovskiy N.N., Cand.of Sci. (Tech.), Assoc.Prof.
National mining university
K. Marx's Avenue, 19, 49005, Dnepropetrovsk, Ukraine

In the paper a new method for estimation of current-limiting level for active rectifier voltage regulator is developed. The method is based on dynamic modes calculation.

Key words: active rectifier, control under perturbations, transient function, current-limiting level.