

УДК 621.318

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С КОММУТИРУЮЩИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКИ

Магазинник Л.Т., Магазинник Л.М.

Ульяновский государственный технический университет

Ульяновск, Россия

tai@ulstu.ru

Регулируемые преобразователи частоты, как непосредственные (НПЧ), так и со звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения (ПЧ с АИН) или тока (ПЧ с АИТ) получили широчайшее распространение в электроприводе и электротехнологии.

В [1] предложен ПЧ, силовая схема которого практически идентична трехфазной мостовой схеме ПЧ с АИТ, но как и в НПЧ, коммутация тиристорных инвертора сетевая (естественная) и есть двухсторонняя связь между нагрузкой и сетью, то есть возможен режим рекуперации энергии в сеть, а частотный диапазон примерно такой же, как и в «классическом» НПЧ.

Таким образом, очевидные преимущества предлагаемого ПЧ заключаются в простоте его силовой схемы: два тиристорных моста вместо шести в «классическом» НПЧ аналогичной пульсности.

Однако очевидны и недостатки: как у всех ПЧ со звеном постоянного тока имеет место двойное преобразование энергии (что, учитывая малые потери в тиристорах, не столь существенно), а главное, в цепь питания выпрямителя вводятся три однофазных насыщающихся трансформатора.

Следовательно, решение вопроса о конкурентности ПЧ по сравнению с обычным НПЧ возможно лишь с учетом основных параметров упомянутых коммутирующих трансформаторов, рассчитанных для конкретных нагрузок.

В [1] описаны коммутационные процессы в ПЧ со звеном постоянного тока и сетевой коммутацией, изложена методика расчета основных параметров коммутирующих трансформаторов и определены эти параметры применительно к использованию в качестве нагрузки асинхронных короткозамкнутых двигателей серии «4А», 380 В.

При анализе коммутационных процессов приняты следующие допущения:

1. Индуктивность дросселя в цепи выпрямленного тока $L_d \rightarrow \infty$, а значит и ток в межкоммутационном интервале неизменен.
2. Коммутирующие трансформаторы имеют сердечники с «идеальной» прямоугольной петлей гистерезиса.

Анализ коммутационных процессов показал, что коммутирующие трансформаторы должны быть рассчитаны на время насыщения большее, чем время коммутации инвертора при максимальной нагрузке.

В электрических градусах указанный временной интервал, то есть угол коммутации γ , определяется из известного трансцендентного уравнения [2]:

$$I = \frac{U_k}{X_\Sigma} [\cos a - \cos(a + g)] \quad (1)$$

где I – ток нагрузки; X_Σ – суммарный реактанс контура коммутации; U_k – амплитуда коммутирующего напряжения:

$$U_k = \frac{U_{\text{лм}}}{K_{TP}} \quad (2)$$

($U_{\text{лм}}$ – амплитуда линейного напряжения питающей сети; K_{TP} – понижающий коэффициент трансформации).

Важнейший параметр коммутирующих трансформаторов – произведение сечения сердечника S на число витков первичной обмотки W_1 – можно оценить по отношению интегралов:

$$(SW_1)^* \approx \frac{\int_0^{a+g} \sin wt \cdot dwt}{\int_0^a \sin wt \cdot dwt} = \frac{1}{2} \int_a^{a+g} \sin wt \cdot dwt \quad (3)$$

где $(SW_1)^*$ – относительное значение вольт-секундного интеграла на коммутирующем трансформаторе по отношению к вольтсекундному интегралу сетевого напряжения за один полупериод.

При заданном токе нагрузки приращение магнитного потока $d\Phi$ за время коммутации постоянно и не зависит от α , что позволяет определить $(SW_1)^*$ для любого частного значения α .

Действительно, при $\alpha = 0$ выражение (3) с учетом (1) дает:

$$(SW_1)^* = \frac{1}{2} \int_0^{\arccos(1-A)} \sin wt \cdot dwt = \frac{A}{2}, \quad (4)$$

а при $\alpha = \pi/2$

$$(SW_1)^* = \frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{\arccos \sqrt{1-A^2}} \sin wt \cdot dwt = \frac{A}{2}, \quad (5)$$

$$\text{где } A = (I_n \cdot K_T \cdot 2X_a \cdot K_{TP}) : U_{\text{лм}} \quad (6)$$

(I_n – номинальный ток нагрузки; K_T – коэффициент перегрузки по току; X_a – суммарный реактанс одной фазы в контуре коммутации).

Реактансом рассеяния коммутирующего трансформатора можно пренебречь, так как он значительно меньше реактансов фаз двигателей (нагрузки).

В этом случае при известном реактансе нагрузки выражения (5) и (6) позволяют легко рассчитать вольтсекундный интеграл $(SW_1)^*$.

Например, для асинхронных короткозамкнутых двигателей серии «4А», 380 В во всем диапазоне мощностей до 315 кВт расчеты дают следующие результаты:

$$(2,3 \cdot K_T) \% \leq (SW_1)^* \leq (5 \cdot K_T) \% \quad (7)$$

- для двигателей с синхронными частотами вращения 3000, 1500 и 1000 об/мин и

$$(4,7 \cdot K_T) \% \leq (SW_1)^* \leq (6,3 \cdot K_T) \% \quad (8)$$

- для двигателей с $n_0 = 750$ об/мин.

Выражения (7) и (8) получены для $K_{тр} = 1,2$, то есть для $i_m^* = 20\% I_{ном}$.

В реальной ситуации $i_m^* \ll 20\% I_{ном}$, поэтому коэффициент трансформации может быть уменьшен, например, до $K_{тр} = 1,1$ и, соответственно, уменьшится $(SW_1)^*$ в (7) и (8).

Относительная (реактивная) мощность коммутирующих трансформаторов может быть определена как энергия коммутации в единицу времени, отнесенная к мощности установки. Учитывая, что при заданном токе нагрузки I энергия единичной коммутации равна $LI^2/2$, где $L = X:w$ – индуктивность фазы в контуре коммутации, $I \leq I_{ном}$ по условиям нагрева, число фаз равно трем, а при $f_1 = f_2 = 50$ Гц за $T = 0,01$ с в фазе совершается коммутация, реактивная мощность коммутирующих трансформаторов

$$Q^* = \frac{3I_{ном}^2 \cdot X \cdot h}{T \cdot w \cdot P_{ном}} \quad (9)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность нагрузки (двигателя); η – КПД; $w = 314$; X – фазный реактанс в контуре коммутации.

Расчеты по выражению (9) дают следующие результаты:

$$2 \% \leq Q^* \leq 2,65 \% \quad - \text{ в группе двигателей 3000, 1500 и 1000 об/мин,}$$

$$2,8 \% \leq Q^* \leq 4,15 \% \quad - \text{ в группе 750 об/мин.}$$

Сопоставление результатов расчета относительной мощности коммутирующих трансформаторов и вольтсекундного интеграла $(SW_1)^*$ позволяют заключить, что последний является определяющим, то есть «установленная мощность» коммутирующих трансформаторов в рассмотренном случае не

превышает 5 % мощности установки в целом – при номинальных нагрузках и 10 % - при возможных двукратных перегрузках.

В «классическом» безтрансформаторном НПЧ между сетью и преобразователем устанавливаются токоограничивающие реакторы (воздушные или с сердечником). В исследуемом ПЧ роль токоограничивающих реакторов могут выполнять коммутирующие трансформаторы, вполне соизмеримые с реакторами по массогабаритным показателям. В то же время, как упомянуто выше, число силовых тиристорov в описанном ПЧ втрое меньше. Следовательно, проще конструкция ПЧ и его система управления (меньше каналов управления). Установка в целом получается значительно компактнее, чем обычный НПЧ и ее применение для низковольтных асинхронных двигателей «4А» представляется оправданным, особенно для приводов, работающих в старт-стопном режиме, в режиме переменных частот вращения, сопровождающихся «подтормаживанием» при переходе на меньшую частоту вращения, то есть в тех случаях, когда режим рекуперативного торможения занимает существенную часть времени в рабочем цикле привода (трудности реализации режима рекуперации в ПЧ с автономными инверторами общеизвестны).

Заметим, что как и в известных НПЧ, на низких частотах может быть осуществлена модуляция угла запаздывания включения α с целью получения квазисинусоидального тока в обмотках двигателя.

Применение ПЧ с описанным способом коммутации инвертора может оказаться весьма эффективным и, например, в надсинхронном вентильном каскаде, где коммутирующие трансформаторы используются лишь в окрестности перехода через синхронную частоту вращения двигателя [1], а также в синхронных частотно-регулируемых электроприводах (вентильных двигателях) – для разгона до частоты вращения $n \approx (10-15) \% n_0$, когда уже возможна коммутация за счет ЭДС самого двигателя, однако данная рекомендация требует как схемных проработок, так и дальнейшего количественного анализа, выходящих за рамки данной журнальной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магазинник Л.Т. Дискретно-регулируемый преобразователь частоты для электроприводов переменного тока // Известия вузов. Проблемы энергетики.- 2004.- № 5-6.- С. 48-55.

2. Каганов И.Л. Промышленная электроника.- М.: «Высшая школа», 1968.