

УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОГО ТОРМОЖЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Управляемое торможение движущегося механизма является одной из функций, реализуемой регулируемым электроприводом. Аппаратные средства и способы торможения электродвигателей переменного тока известны и описаны в литературе, например, в [2]. Основой для реализации тормозных режимов электродвигателей переменного тока являются, как правило, схемы двухзвенных преобразователей частоты с неуправляемым выпрямителем и тормозным резистором в звене постоянного тока или с управляемым сетевым преобразователем для рекуперации энергии торможения в питающую сеть.

Для электропривода по системе «неуправляемый выпрямитель – инвертор напряжения – бесконтактный двигатель с постоянными магнитами (БДПМ)» [1] оказывается возможной реализация режима торможения двигателя путем создания условий для рассеяния кинетической энергии, накопленной во вращающихся частях механизма, в статорных обмотках без использования для этого дополнительных тормозных устройств. Рассеяние кинетической энергии может быть приемлемо для электроприводов малой мощности (до 1 – 2 кВт).

Определим условия безопасного торможения БДПМ, при котором напряжение в звене постоянного тока преобразователя частоты ограничивается на безопасном уровне.

В общем случае условием безопасного торможения двигателя является неравенство

$$|P_{TK}(t)| \leq P_{TP}(t), \quad (1)$$

где $P_{TK}(t)$ – мгновенная мощность, расходуемая в процессе торможения двигателя механическим аккумулятором кинетической энергии в виде вращающихся маховых масс ротора и механизма; $P_{TP}(t)$ – мгновенная мощность, рассеиваемая при торможении двигателя в элементах электропривода и механизма. Отметим, что в неравенстве (1) необходимо сравнивать абсолютные значения мощностей, поскольку, как будет показано ниже, величина $P_{TK}(t)$ при торможении механизма оказывается отрицательной.

Предположим, что энергия в процессе торможения рассеивается только в статорных обмотках двигателя и трущихся частях механизма. Тогда $P_{TP}(t) = P_{ЭЛ}(t) + P_{МХ}(t)$, где $P_{ЭЛ}(t)$ и $P_{МХ}(t)$ – соответственно мгновенные мощности потерь в статорных обмотках и механизме. Предположим также, что частота вращения двигателя при торможении изменяется по линейному закону $\omega(t) = \omega_1(1 - t/t_1)$ при $0 \leq t \leq t_1$, где ω_1 – максимальное значение частоты вращения двигателя; t_1 – заданное время торможения механизма от максимальной частоты вращения до нулевой, причем электромагнитная постоянная времени статорной обмотки БДПМ значительно меньше времени торможения.

Определим мгновенные мощности $P_{TK}(t)$, $P_{ЭЛ}(t)$ и $P_{МХ}(t)$.

Первая определяется как производная кинетической энергии вращающихся ротора и частей механизма при заданном выше законе изменения частоты вращения $\omega(t)$ вала двигателя в процессе торможения

$$P_{TK}(t) = \frac{J}{2} \cdot \frac{d\omega^2(t)}{dt} = \frac{J \cdot \omega_1^2}{t_1} \left(\frac{t}{t_1} - 1 \right), \quad \text{где } J - \text{ суммарный момент инерции двигателя и механизма, приведенный}$$

к валу двигателя.

$$P_{ЭЛ}(t) = m \cdot R \cdot I_C^2 \quad \text{или} \quad P_{ЭЛ}(t) = 0,5 \cdot m \cdot R \cdot (i_d^2 + i_q^2), \quad (2)$$

где m и R – число фаз и активное сопротивление статорной обмотки; I_C – действующее значение тока фазы статорной обмотки; i_d и i_q – компоненты статорного тока в координатах ротора d и q .

$P_{МХ}(t) = M_C(\omega) \cdot \omega(t)$, где $M_C(\omega)$ – величина момента сопротивления приводного механизма в зависимости от частоты вращения двигателя, причем отметим типовые варианты зависимости $M_C(\omega) = M_C = const$ или $M_C(\omega) = M_C \cdot (a + b \cdot (\omega/\omega_1)^2)$ при $a + b = 1$.

Поскольку торможение должно произойти за время t_1 , необходимо на основании уравнения динамики электропривода в тормозном режиме определить величину тормозного момента двигателя $M_T(\omega) = M_C(\omega) - J \cdot \omega_1/t_1$, где второе слагаемое $J \cdot \omega_1/t_1$ соответствует величине динамического момента двигателя при равноускоренном движении. В зависимости от соотношения значений слагаемых величина $M_T(\omega)$ может оказаться как положительной, так и отрицательной.

С другой стороны, тормозной момент определяется параметрами двигателя и величиной компоненты тока статора i_q - $M_T(\omega) = 0,5 \cdot m \cdot k_m \cdot i_q(\omega)$, где k_m - коэффициент момента двигателя.

На основании полученных выражений для момента $M_T(\omega)$ определим функциональную зависимость компоненты тока $i_q(\omega)$, при которой должно происходить равномерное торможение двигателя,

$$i_q(\omega) = \frac{1}{0,5 \cdot m \cdot k_m} \left(M_C(\omega) - J \frac{\omega_1}{t_1} \right). \quad (3)$$

Теперь необходимо проверить условие (1) на всем интервале $0 \leq t \leq t_1$, подставляя (3) в (2) и полагая вначале $i_d(\omega) = 0$, поскольку при соблюдении последнего равенства осуществляется экономичная работа БДПМ в двигательном режиме. Если на данном этапе условие (1) выполняется, то безопасное торможение двигателя в течение заданного времени t_1 возможно при $i_d(\omega) = 0$.

Если неравенство (1) не выполняется по крайней мере на части интервала $0 \leq t \leq t_1$, то создание условий для рассеяния энергии торможения двигателя возможно путем намеренного задания в ходе торможения отличного от нуля значения компоненты тока статора $i_d(\omega)$. Зависимость этой переменной от частоты вращения двигателя может быть определена из условия (1)

$$i_d(\omega) = \sqrt{\frac{2}{m \cdot R} \left(|P_{TK}(t)| - P_{MX}(t) \right) - i_q^2(\omega)} = \sqrt{\frac{2}{m \cdot R} \left(\left| \frac{J \cdot \omega_1^2}{t_1} \left(\frac{t}{t_1} - 1 \right) \right| - M_C(\omega) \cdot \omega(t) \right) - \left(\frac{2}{m \cdot k_m} \left(M_C(\omega) - J \frac{\omega_1}{t_1} \right) \right)^2}.$$

Очевидно, что полученная функциональная зависимость справедлива при положительном значении подкоренного выражения. Иначе $i_d(\omega) = 0$.

Наконец, последнее условие безопасного торможения БДПМ касается теплового состояния статорных обмоток и двигателя в целом и должно определяться соображениями выбора допустимой величины действующего тока статора I_C , протекающего в обмотках во время торможения, а также частотой повторений пусков и торможений двигателя. В случае перегрева двигателя необходимо использование специальных тормозных устройств.

На основании математической модели БДПМ [3] в системе координат ротора d и q запишем также функциональные зависимости для напряжений статора $u_d(\omega)$ и $u_q(\omega)$

$$u_d(\omega) = R \cdot i_d(\omega) - p \cdot L \cdot i_q(\omega) \cdot \omega(t); \quad u_q(\omega) = R \cdot i_q(\omega) + (p \cdot L \cdot i_d(\omega) + k_m) \cdot \omega(t),$$

где p - число пар полюсов двигателя; L - индуктивность фазы статорной обмотки БДПМ.

Таким образом, описанный подход к управлению БДПМ позволяет обеспечить плавное торможение двигателя от максимального значения частоты вращения до его остановки в течение заданного времени t_1 без использования специальных аппаратных средств в схеме двухзвенного преобразователя частоты. Безопасность торможения, означающая недопущение перенапряжений на элементах преобразователя частоты, обеспечивается, если это необходимо, за счет намеренного задания определенной, отличной от нуля величины компоненты статорного тока i_d , и таким образом, рассеяние в проводниках статорных обмоток кинетической энергии, накопленной во вращающихся частях приводного механизма.

Предложенный подход был с успехом применен для торможения высокоскоростных БДПМ малой мощности с повышенным моментом инерции. При известных и неизменных параметрах электромеханической системы «БДПМ – приводной механизм» торможение двигателя возможно в разомкнутой системе даже без контроля напряжения в звене постоянного тока. В противном случае, реализуется замкнутая система ограничения этого напряжения на безопасном уровне при формировании управляющего воздействия $i_d(t)$.

Список использованных источников

- [1] Акинин К.П. Проблемы построения электромеханических систем малой мощности на основе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей // Техн. електродинаміка. Темат. Вип.: Проблеми сучасної електротехніки. – 2010. – Ч.1. – С.118-123.
- [2] Крутиков К.К., Рожков В.В. Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода // Электричество – 2011. - №2. – С.32-38.
- [3] Сидельников Б.В., Рогачевская Г.С. Свойства вентильного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. Специальный выпуск. - Харьков: ХГПУ, 1999. – С.281-282.