

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ «АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Автор: А.В. Волков, Ю.С. Скалко

Описание: В данной работе разработана математическая модель потерь мощности в указанной системе, предназначенная для решения оптимизационных задач энергосберегающего управления асинхронным электроприводом.

Источник: Научно-технический журнал: «Электромашиностроение и электрооборудование». – Одесский национальный политехнический университет – 2006, Выпуск 66, с. 309-310.

В связи с наблюдающимся широким внедрением в последние годы во всех отраслях хозяйства частотно-регулируемых (ЧР) асинхронных электроприводов (ЭП) и продолжающимся обострением проблемы энергосбережения, становится чрезвычайно актуальной и востребованной практикой задача оптимизации энергопотребления указанных ЭП, создаваемых на основе автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД).

В первую очередь, представляет интерес решение данной задачи путем нахождения и реализации оптимальных по энергопотреблению алгоритмов управления асинхронным ЭП на основе АИН-ШИМ, что требует предварительного создания достоверной математической модели потерь мощности в данном электроприводе.

Несмотря на большое внимание, которое уделяется в научно-технической литературе исследованию потерь мощности в ч-р асинхронных ЭП, все известные в этой области работы фактически рассматривают лишь отдельные составляющие указанных потерь. А именно: либо непосредственно в ЧР асинхронном АД (причем, как правило, без учета потерь мощности, вызванных влиянием несинусоидальной формы статорных токов и напряжений) [2, 3, 9] или только в преобразователе частоты [1, 5] (последние обычно описываются такими сложными математическими выражениями, которые на практике не позволяют решать оптимизационные задачи управления).

Целью статьи является разработка математической модели суммарных потерь мощности для системы «автономный инвертор напряжения с ШИМ – асинхронный двигатель», предназначенной для решения оптимизационных задач управления и учитывающей модуляционные потери мощности двигателя, вызванные несинусоидальной формой выходных напряжений и токов инвертора.

Суммарные потери мощности ΔP_{Σ} в системе «АИН-ШИМ – АД» состоят из потерь мощности $\Delta P_{и}$ в инверторе и потерь мощности $\Delta P_{д}$ в двигателе:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{и} + \Delta P_{д}. \quad (1)$$

Потери мощности $\Delta P_{и}$ в инверторе, в свою очередь, состоят из статических $\Delta P_{иS}$ и динамических $\Delta P_{иD}$ потерь мощности:

$$\Delta P_{и} = \Delta P_{иS} + \Delta P_{иD}, \quad (2)$$

которые, как известно, являются сложными функциями текущих значений: токов, протекающих через IGBT-транзисторы и через шунтирующие их диоды; прямого падения напряжения на IGBT-транзисторе в открытом состоянии и обратного падения напряжения на шунтирующем диоде; напряжения на коллекторе закрытого IGBT-транзистора; частоты модуляции (переключения) IGBT-транзисторов [5, 8].

Принимая во внимание существенную сложность точного расчета потерь мощности $\Delta P_{и}$ в АИН-ШИМ [5, 8], авторы статьи предложили определять данные потери приближенно из упрощенных соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{иS} &= K_1 I_v^* + K_2 I_v^{*2} \\ \Delta P_{иD} &= \alpha_{и} K_3 I_v^* \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где I_v^* – среднее значение фактического тока через силовой ключ (протекающего через IGBT-транзистор или шунтирующий его диод):

$$I_v^* = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} |I_v| dt. \quad (4)$$

В соотношениях (3) и (4) используются обозначения: T_1 – период основной гармоники выходного напряжения (или тока) инвертора; K_1, K_2 – коэффициенты, связывающие среднее значение протекающего через IGBT-транзистор тока со статическими потерями в нем; K_3 – коэффициент пропорциональности, связывающий значение среднего тока I_v^* силового ключа с динамическими потерями мощности $\Delta P_{иD}$ инвертора при частоте модуляции $f_{и}$ силовых ключей, равной 50 Гц; $\alpha_{и}$ – относительное значение частоты модуляции силовых ключей инвертора, рассчитываемое в виде:

$$\alpha_{и} = f_{и}/50, \quad (5)$$

где 50 Гц – номинальное значение частоты.

Потери мощности $\Delta P_{д}$ ч-р короткозамкнутого АД равны сумме электромагнитных потерь $\Delta P_{эм}$ и механических потерь $\Delta P_{мех}$ мощности:

$$\Delta P_d = \Delta P_{эм} + \Delta P_{мех}, \quad (6)$$

где последние составляют лишь незначительную часть (менее 5–10 % от номинальных потерь мощности АД) и зависят (примерно в квадратичной зависимости) только от частоты вращения ротора (скорости) двигателя [7].

Электромагнитные потери мощности $\Delta P_{эм}$ содержат добавочные потери $\Delta P_{доб}$, а также основную $\Delta P_{эм.1}$ и модуляционную $\Delta P_{эм.п}$ составляющие электромагнитных потерь мощности:

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_{доб} + \Delta P_{эм.1} + \Delta P_{эм.п}, \quad (7)$$

из которых два первых слагаемых зависят от амплитуды основной гармоники фазного статорного тока, а последнее слагаемое – от действия всех остальных (высших) гармонических составляющих фазного статорного тока АД.

Основные и модуляционные электромагнитные потери мощности состоят из электрических $\Delta P_{э.1}$ или $\Delta P_{э.п}$ и магнитных (в стали) $\Delta P_{м.1}$ или $\Delta P_{м.п}$ потерь:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{эм.1} &= \Delta P_{э.1} + \Delta P_{м.1} \\ \Delta P_{эм.п} &= \Delta P_{э.п} + \Delta P_{м.п} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

которые рассчитываются согласно [8] из следующих зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{э.1} &= \frac{3}{2} (R_s + k^2 R_r \sin^2 \varphi) I_1^2 \\ \Delta P_{м.1} &= \Delta P_{мн} (L_m^2 \cos^2 \varphi + k^2 L_{\sigma r}^2 \sin^2 \varphi) \cdot \alpha_1^{1,3} I_1^2 / \Psi_{мн}^2 \\ \Delta P_{э.п} &= \frac{1}{2} (R_s + k^2 R_r) \alpha_{п1} \Delta I_{п1}^2 \\ \Delta P_{м.п} &= \Delta P_{мн} k^2 L_{\sigma r}^2 \alpha_{п1,3} \Delta I_{п1}^2 / \Psi_{мн}^2 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

В (9) используются следующие обозначения: P_n , $I_{1н}$ и η_n – номинальные значения соответственно мощности, амплитуды статорного тока и КПД двигателя; $\Delta P_{мн}$ и $\Psi_{мн}$ – номинальные значения соответственно потерь в стали двигателя и амплитуды магнитного потока АД в воздушном зазоре; R_s и R_r – активные сопротивления статора и ротора двигателя соответственно; L_m и $L_{\sigma r}$ – индуктивность намагничивания и индуктивность рассеяния ротора АД соответственно; φ и k – угол нагрузки (под которым понимается угол между обобщенными векторами статорного тока и потокосцепления ротора АД) и коэффициент связи ротора двигателя соответственно; α_1 , I_1 и $\Delta I_{п1}$ – соответственно относительная частота основной гармоники, текущая амплитуда основной гармоники фазного статорного тока двигателя и среднеквадратичное отклонение модуля I_s обобщенного вектора статорного тока от своего среднего значения, равного I_1 .

Путем моделирования электромагнитных процессов на цифровой модели [4] асинхронного электропривода с синусоидальной ШИМ и электродвигателем 4АРМП (мощностью 1600 кВт) были рассчитаны (для управления с постоянством потокосцепления ротора двигателя, равного номинальному) зависимости, характеризующие изменение среднего значения тока I_v^* силового ключа инвертора в функции амплитуды I_1 основной гармоники статорного тока, а также

изменение среднеквадратичного отклонения $\Delta I_{п1}$ модуля обобщенного вектора статорного тока в функции частоты $\alpha_{п1}$ модуляции и частоты α_1 основной гармоники статорного тока.

Предложенные в данной статье зависимости представляют собой разработанную авторами аналитическую модель суммарных потерь мощности в системе «АИН с ШИМ – АД», которая предназначена для дальнейшей оптимизации потерь мощности в асинхронном ЭП с АИН-ШИМ.

Список использованной литературы

1. Аранчий Г.В., Жемеров Г.Г., Эпштейн И.И. Тиристорные преобразователи частоты для регулируемых электроприводов. – М.: Энергия, 1968. – 128 с.
2. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
3. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Наука, 1966. – 298 с.
4. Волков А.В., Скалько Ю.С. Цифровая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением // Электротехника и электроэнергетика. – Запорожье: ЗНТУ. – 2005. – №2. – С. 75-81.
5. Глазенко Т.А., Гончаренко Р.Б. Полупроводниковые преобразователи частоты в электроприводах. – Л.: Энергия, 1969. – 184 с.
6. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: ГНУ, 2006. – 470 с.
7. Радин В.И., Брусин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины. Асинхронные машины. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.
8. Сорин Н.Л., Колпахчян П.Г., Янов В.П. Выбор способа моделирования IGBT-транзистора в системе «статический преобразователь – асинхронный двигатель» // Электротехника. – 2004. – №4. – С.7-10.
9. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.