

Расчет емкости накопительного конденсатора для системы группового питания частотно-регулируемых асинхронных электроприводов, снабженной активным фильтром

Предложен расчет емкости накопительного конденсатора для системы группового питания частотно-регулируемых асинхронных электроприводов, снабженной активным фильтром.

Известно, что в настоящее время электроприводы потребляют около 70 % вырабатываемой в Украине электроэнергии. В связи с этим вопросы энергосбережения и повышения качества электроэнергии в системах промышленного электропривода являются актуальными и важными. Одним из возможных путей решения задачи энергосбережения является применение группового питания для асинхронных электроприводов на основе автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). При этом указанные частотно-регулируемые электроприводы получают питание от общих шин постоянного тока с использованием емкостных накопителей энергии.

Такая система питания электроприводов обладает рядом существенных преимуществ [1–3]: во-первых, – гибкой конфигурацией и унификацией силовых блоков и модулей управления. Во-вторых, – сокращением временной длительности режимов двухстороннего обмена энергии между сетью и двигателями (так как часть энергии от рекуперативного торможения одного или группы двигателей передается, минуя сеть, посредством емкостного накопителя на другие электроприводы, функционирующие в двигательном режиме работы). В-третьих, – снижением динамических нагрузок, воспринимаемых емкостным накопителем (а, следовательно, и потерь энергии в элементах силовой цепи, что одновременно снижает установленную мощность последних). Обратим внимание, что запасенная энергия емкостным накопителем может быть эффективно использована для нормализации основных показателей качества электроэнергии с помощью активных фильтров с релейно-векторным управлением, устанавливаемых в звене постоянного тока группового электропривода параллельно общему неуправляемому (диодному) выпрямителю [4, 5].

К сожалению, до настоящего времени в известной научно-технической литературе отсутствуют исследования и рекомендации по расчету емкости накопительного конденсатора для такой системы группового питания асинхронных электроприводов с АИН-ШИМ. Предложенная статья посвящена расчету емкости конденсаторных накопителей электроэнергии для системы группового питания указанных электроприводов, получающих питание от общей шины постоянного тока, параллельно которой подключен активный фильтр.

В системе группового питания рассматриваемых электроприводов накопительные конденсаторы в зве-

не постоянного тока служат, во-первых, для обмена энергией между электроприводами, работающими в различных режимах, а также, во-вторых, для аккумуляции энергии, поступающей при рекуперативном торможении от группы приводов, или высвобождаемой электромагнитной энергии в обмотках двигателей. Последний случай имеет место как при очередной коммутации ключей инверторов, так и в аварийных режимах, когда принудительно закрываются все ключи инвертора и накопленная энергия в обмотках двигателя поступает через обратные диоды в конденсатор и увеличивает на нем напряжение.

В системах индивидуального асинхронного электропривода с АИН-ШИМ (преобразователь которого содержит выпрямитель и инвертор) допускается максимальное увеличение напряжения в звене постоянного тока примерно на 15 % от рабочего выпрямленного напряжения, равного $U_{d0} = 2,34U_{\phi}$ [6].

В системе группового питания асинхронных электроприводов с АИН-ШИМ (при питании их от общей шины постоянного тока), снабженной параллельным активным фильтром (ПАФ), предназначенным для управления качеством электроэнергии, напряжение на конденсаторе может неконтролируемо увеличиваться из-за влияния энергии, поступающей при рекуперативном торможении от группы приводов лишь в течение собственного времени запаздывания T_{μ} ПАФ (которое обычно принимается при релейном управлении равным 0,001 с [6, 7]).

На первом этапе рассчитаем требуемое значение емкости накопительного конденсатора, необходимой для аккумуляции избыточной энергии рекуперативного торможения. При изменении в процессе работы электропривода угловой частоты (скорости) ротора двигателя от ω_1 до ω_2 , отдаваемая приводом кинетическая энергия составляет:

$$\Delta W = J(\omega_1^2 - \omega_2^2)/2, \quad (1)$$

где J – суммарный приведенный момент инерции привода.

По отношению к исходному запасу кинетической энергии привода указанное изменение составляет:

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1^2} = \omega^* (2 - \omega^*), \quad (2)$$

где $\omega^* = (\omega_1 - \omega_2) / \omega_1$ – относительное снижение скорости при торможении.

Из выражения (2) следует, что процесс отдачи накопленной кинетической энергии происходит непропорционально скорости и в конце процесса торможения происходит с меньшей интенсивностью.

При линейном законе изменения скорости в процессе торможения текущее значение скорости ω_2 по истечении упомянутого времени запаздывания T_μ ПАФ составляет:

$$\omega_2 = \omega_1 - \frac{\omega_1}{t_T} T_\mu, \quad (3)$$

где t_m – время торможения привода.

Отдаваемая при этом энергия в процессе торможения равна:

$$W_T = \frac{J}{2} (\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{J}{2} \left[\omega_1^2 - \left(\omega_1 - \frac{\omega_1}{t_T} T_\mu \right)^2 \right] = \frac{J \omega_1^2 T_\mu}{2 t_T} (2 - T_\mu / t_T). \quad (4)$$

Обычно $t_m \gg T_\mu$, поэтому (4) можно представить в виде:

$$W_T = \frac{J \omega_1^2}{t_T} T_\mu = \omega_1 T_\mu (M_T + M_c), \quad (5)$$

где $t_T = J \omega_1 / (M_T + M_c)$ – время торможения; M_T, M_c – тормозной момент двигателя и момент сопротивления соответственно.

Полагая, что торможение начинается с номинального значения скорости ($\omega_1 = \omega_n$) при номинальном значении момента сопротивления ($M_c = M_n$), получим из (5):

$$W_T = T_\mu (\lambda + 1) P_n, \quad (6)$$

где $\lambda = M_T / M_n$ – отношение тормозного момента к номинальному электромагнитному моменту двигателя (причем, предельное значение данного отношения соответствует перегрузочной способности двигателя); P_n – номинальная электромагнитная мощность двигателя.

Пренебрегая потерями в инверторе и двигателе, условие равенства отдаваемой кинетической энергии привода и энергии, запасаемой в конденсаторе, можно представить в виде:

$$T_\mu (\lambda + 1) P_n = 0,5 C_d [(U_d + \Delta U)^2 - U_d^2] = 0,5 C_d (2 U_d \Delta U + \Delta U^2), \quad (7)$$

где U_d и ΔU – соответственно начальное значение напряжения на конденсаторе фильтра (в начале торможения) и его превышение по окончании торможения.

Согласно приведенному выражению получим:

$$C_d = \frac{T_\mu (\lambda + 1) P_n}{0,5 \Delta U_{\text{доп}} (2 U_d + \Delta U_{\text{доп}})}, \quad (8)$$

где $\Delta U_{\text{доп}}$ – максимально допустимое превышение напряжения на конденсаторе фильтра.

Так, например, при $U_d = 500$ В, $\Delta U_{\text{доп}} = 0,1 U_d$, $T_\mu = 0,002$ с требуется на 1кВт мощности двигателя устанавливать накопительный конденсатор емкостью:

$$C_d \approx 75 (\lambda + 1) \text{ мкФ}, \quad (9)$$

что при $\lambda = (1,5 - 2)$ составляет менее (190–225) мкФ на 1кВт установленной мощности двигателя.

Для системы группового питания электроприводов (с общим входным выпрямителем) можно представить выражение (8) в виде:

$$C_d = \frac{T_\mu \Delta P_T}{0,5 \Delta U_{\text{доп}} (2 U_d + \Delta U_{\text{доп}})}, \quad (10)$$

где ΔP_T – превышение мощности рекуперативного торможения над потребляемой.

На **втором этапе** рассчитаем значение емкости накопительного конденсатора, требуемое при аварийном режиме записания всех силовых ключей одного из АИН-ШИМ. При этом энергию, отдаваемую двигателем в аварийном режиме при принудительном записании ключей инвертора, можно без большой погрешности определить в предположении постоянства потокосцепления ротора [8].

Непосредственно перед запиранием всех ключей инвертора результирующие векторы потокосцеплений статора $\bar{\Psi}_{10}$ и ротора $\bar{\Psi}_{20}$ в синхронно вращающейся системе координат определяются из соотношений [8]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Psi}_{10} &= L_1 \bar{I}_{10} + L_m \bar{I}_{20}; \\ \bar{\Psi}_{20} &= L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20}; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где L_1, L_2, L_m – полные индуктивности статора и ротора, взаимная индуктивность двигателя соответственно.

После закрытия обратных диодов статорный ток становится равным нулю ($\bar{I}_1 = 0$), с учетом чего согласно (11) получим:

$$\bar{\Psi}_1 = L_m \bar{I}_2 \text{ и } \bar{\Psi}_2 = L_2 \bar{I}_2, \quad (12)$$

где \bar{I}_2 – результирующий вектор тока ротора после закрытия обратных диодов.

Согласно приведенным выражениям найдем:

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{\Psi}_2 L_m / L_2 = \bar{\Psi}_2 K_2. \quad (13)$$

Полагая, что потокосцепление ротора остается неизменным, определим:

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{\Psi}_{20} K_2, \quad (14)$$

где $K_2 = L_m / L_2$ – коэффициент магнитной связи ротора. На рис.1 показана в течение времени проводящего состояния обратных диодов соответствующая векторная диаграмма потокосцеплений статора и ротора двигателя.

В общем случае запасенная электромагнитная

енергия двигателем перед закрытием всех силовых ключей АИН-ШИМ определяется как сумма скалярных произведений соответствующих векторов [8]:

$$W_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} [\bar{\Psi}_{10} \bar{I}_{10}^* + \bar{\Psi}_{20} \bar{I}_{20}^*], \quad (15)$$

где $\bar{I}_{10}^*, \bar{I}_{20}^*$ – сопряженные результирующие вектора токов статора и ротора до закрытия силовых ключей инвертора.

После закрытия ключей: $\bar{I}_1 = 0$ и $\bar{\Psi}_2 = \bar{\Psi}_{20}$, с учетом чего запасенная энергия становится равной:

$$W_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \bar{\Psi}_{20} \bar{I}_2^*. \quad (16)$$

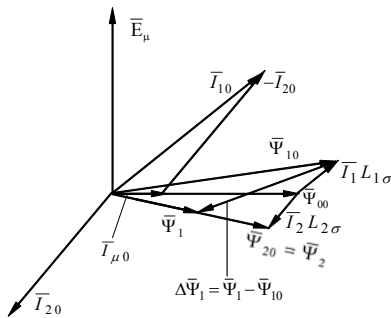


Рис.1. Векторная диаграмма потокоцепления статора и ротора до и после закрытия ключей инвертора

Изменение магнитной энергии равно:

$$\Delta W = W_0 - W_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} [\Psi_{10} \bar{I}_{10}^* + \bar{\Psi}_{20} (\bar{I}_{20}^* - \bar{I}_2^*)]. \quad (17)$$

Разность токов $(\bar{I}_{20}^* - \bar{I}_2^*)$ в выражении (17) может быть найдена из условия постоянства потокоцепления ротора $L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20} = L_2 \bar{I}_2$ в виде:

$$\bar{I}_{20} - \bar{I}_2 = \bar{I}_{10} L_m / L_2 = -\bar{I}_{10} K_2. \quad (18)$$

С учетом (18) получим из (17):

$$\begin{aligned} \Delta W &= \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \left[(L_1 \bar{I}_{10} + L_m \bar{I}_{20}) \bar{I}_{10}^* - (L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20}) \frac{L_m}{L_2} \bar{I}_{10}^* \right] = \\ &= \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} I_{10}^2 L_{1n}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $L_{1n} = L_1 - L_m^2 / L_2$ – переходная индуктивность обмотки статора [8]. Таким образом, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в аварийном режиме при закрытии силовых ключей инвертора в отношении изменения магнитной энергии может рассматриваться как катушка с индуктивностью, равной $3L_{1n} / 2$.

В соотношении (19) для расчета изменения энергии ΔW для системы группового питания асинхронных электроприводов с АИН-ШИМ (в количестве n штук) следует подставлять суммарную переходную индуктивность $L_{n1\Sigma}$ обмоток статора всех двигателей и суммарный ток $I_{1\Sigma}$, потребляемый всеми двигателями. При этом, по аналогии с (7) и (8), получим выражение для расчета емкости накопительного конденсатора, необходимой для аккумулирования электромагнитной энергии при аварийном закрытии силовых ключей во всех инверторах:

$$C_d = \frac{3}{2} \frac{I_{1\Sigma}^2 L_{n1\Sigma}}{\Delta U_{\text{доп}} (2U_d + \Delta U_{\text{доп}})}. \quad (20)$$

Перечень ссылок

1. Колб А. А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. – Кременчуг, 2003, вып.1. – С. 135–139.
2. Воробьев А. А., Колб А. А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергосбережения // Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ. – 2003. – №10. – С. 224–228.
3. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов, А. А. Сушиков. – Электротехника. – 2003. – № 5. – С. 12–16.
4. Колб А.А. Пространственно – векторное управление групповым IGBT- преобразователем для коррекции качества электроэнергии в системах электропривода с общими шинами постоянного тока // Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: НГУ, 2004, вип. № 71. – С. 46–53.
5. Колб А.А. Релейно – векторное управление силовым активным фильтром в режиме компенсации мощности искажения // Науковий вісник. – Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – №3. – С. 68–74.
6. Перельмутер В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
7. Malesani L., Rossetto L., Tenti P. AC/DC/AC PWM Converter with Reduced Energy Storage in the DC Link. IEEE Trans. Ind. Applicat, №2, 1985, P. 287–292.
8. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 774 с.

Поступила в редакцию 22.12.05 г.

После доработки 7.12.06 г.

Запропоновано розрахунок ємкості накопичуючого конденсатора для системи групового живлення частотно-регульованих асинхронних електроприводів, яка обладнана активним фільтром.

It is offered a calculation of capacity of the reservoir capacitor for system of a group power supply of frequency-controlled asynchronous drives equipped with the active filter.