

В.И. МИШИН, д-р. техн. наук, проф., Национальный аграрный университет, Киев

Р.Н. ЧУЕНКО, канд. техн. наук, доц., Национальный аграрный университет, Киев

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОБОБЩЕННОГО КОМПЕНСИРОВАННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Розроблена методика розрахунку характеристик узагальненого компенсованого асинхронного двигуна без урахування зміни опору кола намагнічування.

Разработана методика расчета характеристик обобщенного компенсированного асинхронного двигателя без учета изменения сопротивления намагничивающего контура.

Введение. Простота устройства, надежность, низкая стоимость обеспечили широкое использование в практике асинхронных двигателей (АД). К тому же АД является универсальным электромеханическим преобразователем энергии и электромагнитным преобразователем ее параметров [1, 2]. Она может работать в режимах двигателя и генератора, преобразователя напряжения, частоты, числа фаз и т.д. Однако во всех режимах, преобразуя активную энергию в другие виды, она потребляет реактивную, которая не преобразуется в другие виды, а лишь создает переменное магнитное поле. Это снижает технико-экономические показатели машины, увеличивает потери электроэнергии в ней и во всех элементах питающей сети, снижает качественные показатели преобразования энергии.

Для снижения потребления реактивной мощности АД обычно применяют, так называемую, внешнюю компенсацию; например, с помощью электрических конденсаторов, включенных параллельно потребителю. Обмен реактивной энергией между конденсатором и потребителем частично или полностью освобождают сеть от ее перетоков, снижает потери энергии в питающей сети, но не оказывает влияния на сам потребитель – физические процессы в нем, его свойства и характеристики остаются неизменными.

Компенсированной называем АД с внутренней емкостной компенсацией реактивной мощности, которая изменяет свойства самой машины, приводит к изменению физических процессов в ней, ее характеристик и технико-экономических показателей, повышает эффективность ее использования [4].

При этом конструктивно базовая серийная машина не изменяется, только фазная зона трехфазной обмотки статора делится на две части, пространственно смещенные между собой в пазах сердечника статора на угол $\theta = 30^\circ$. Эти обмотки, как рабочие обмотки статора, включаются в питающую сеть по схеме поворотного автотрансформатора (АТ) на электрическую емкость (C_Δ).

Вторичная обмотка АТ может быть зашунтирована дополнительной емкостью C_k . Двигатель с двойной внутренней емкостной компенсацией в определенной мере является обобщенной модификацией компенсированного АД. Исключение емкости C_k приводит к односторонней компенсации и при полном исключении компенсирующих емкостей $\theta = 0$ двигатель становится базовым АД.

Методика расчета. В качестве базового для примеров расчета характеристик принят трехфазный короткозамкнутый АД типа 4А71В2 с параметрами Т-образной схемы замещения:

– при единой обмотке (рис. 1, а): $R_{10} = 10$ Ом; $X_{10} = 4.72$ Ом; $R_2 = 5.91$ Ом; $X_2 = 7.2$ Ом; $X_{mn} = 249.2$ Ом [3];

– при двух параллельных одинаковых ветвях обмотки статора эквивалентных его единой обмотке (рис. 1, б):

$R_1 = 2R_{10} = 20$ Ом – активное сопротивление ветви;

$X_1 = 4.72$ Ом – собственное индуктивное сопротивление рассеяния ветви и равное ему сопротивление рассеяния между параллельными ветвями единой обмотки.

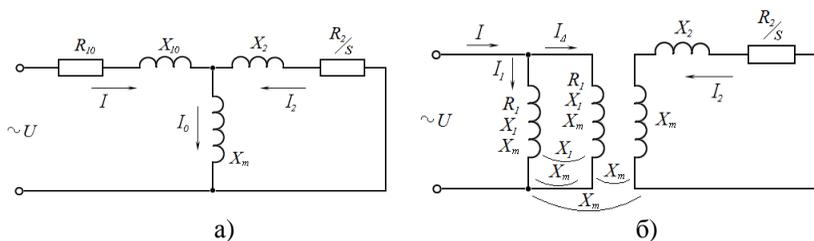


Рис. 1. Электрическая схема замещения серийного АД с единой обмоткой статора (а) и с двумя параллельными ветвями обмотки статора (б)

В компенсированных АД сопротивление рассеяния между двумя ветвями обмотки фазы за счет их пространственного смещения между собой равно $X_1 \cos \theta$. При $\theta \neq 0$ им иногда пренебрегают, учитывая только собственное сопротивление рассеяния ветви, которое равно сопротивлению рассеяния единой обмотки фазы (при одинаковых числах витков ветви и единой обмотки).

Сопротивление R_2 и X_2 ротора в обеих схемах одинаковы и принимаются постоянными.

В качестве расчетной принимаем схему (рис. 2, а) обобщенного компенсированного АД, которая является основой для частных вариантов – компенсированного АД с одной компенсирующей емкостью C_Δ (рис. 2, б) и базового серийного АД (рис. 1).

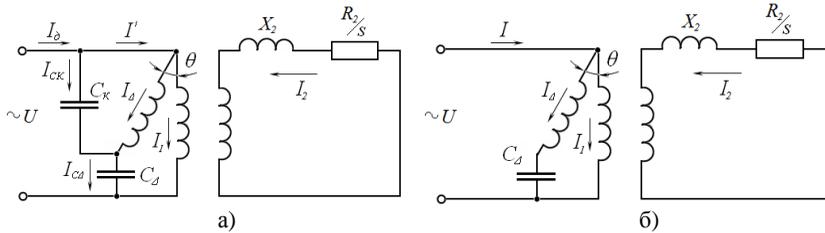


Рис. 2. Схемы замещения фазы обобщенного компенсированного асинхронного двигателя (ОКАД) (а) и с одной внутренней емкостной компенсацией (КАД) (б)

В симметричном режиме установившегося процесса все фазы АД находятся в одинаковых условиях, поэтому расчетные уравнения электрического равновесия контуров составляются для одной фазы с следующими преобразованиями:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 + j\dot{I}_\Delta X_1 \cos\theta = \dot{I}_\Delta Z_0; \\ \dot{U} &= -\dot{E}_\Delta + \dot{I}_\Delta Z_\Delta + j\dot{I}_1 X_1 \cos\theta + \dot{U}_{C_\Delta}; \\ \dot{U}_\Delta &= -\dot{E}_\Delta + \dot{I}_\Delta Z_\Delta + j\dot{I}_1 X_1 \cos\theta = -jX_{Ck} \dot{I}_{Ck}; \\ 0 &= -\dot{E}_2 + \dot{I}_2 \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right). \end{aligned} \quad (1)$$

где \dot{U} – напряжение источника питания двигателя, \dot{E}_1 , \dot{E}_Δ , \dot{E}_2 – ЭДС соответствующих обмоток, причем в приведенном АД $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$, $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\theta}$, \dot{I}_1 , \dot{I}_Δ , \dot{I}_2 – их токи, \dot{I}_{C_Δ} , \dot{I}_{Ck} – токи емкостей C_Δ, C_k .

При решении системы (1) относительно токов принимаем [5]:

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_\Delta = R_1 + jX_1; \quad Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2; \quad \theta = 30^\circ; \\ Z_{2m} = Z_2 + jX_m; \quad Z_s = jX_m + \frac{X_m^2}{Z_{2m}} = jX_m \frac{Z_2}{Z_{2m}}; \quad K_c = 1 + \frac{X_{C_\Delta}}{X_{Ck}}. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jX_m(\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} + \dot{I}_2) = -jX_m \dot{I}_0, \\ \dot{U}_{C\Delta} = -jX_{C\Delta} \dot{I}_{C\Delta} = \dot{U} - \dot{U}_\Delta \approx -\dot{E}_1 + \dot{E}_\Delta, \\ \dot{I}_{C\Delta} = \dot{I}_\Delta + \dot{I}_{Ck}, \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta + \dot{I}_{Ck} = \frac{\dot{U}}{Z_0}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} = \frac{\dot{E}_1}{Z_2}; \quad \dot{I}_{Ck} = \frac{-j\dot{E}_1 e^{j\theta} + j\dot{I}_\Delta Z_1 - \dot{I}_1 X_1 \cos\theta}{X_{Ck}} = \\ = \frac{(jZ_s e^{j\theta} - X_1 \cos\theta)\dot{I}_1 + j(Z_1 + Z_s)\dot{I}_\Delta}{X_{Ck}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Зависимость токов \dot{I}_1 , \dot{I}_Δ обмоток статора от основного энергетического параметра \dot{U} – питающего напряжения из уравнений 1, 2 системы (1) представлена в виде:

$$a\dot{U} = b\dot{I}_1 + c\dot{I}_\Delta; \quad d\dot{U} = e\dot{I}_1 + f\dot{I}_\Delta. \quad (5)$$

$$a = d = 1; \quad b = Z_1 + Z_s; \quad c = Z_s e^{-j\theta} + jX_1 \cos\theta$$

$$e = (Z_s e^{j\theta} + jX_1 \cos\theta)K_c; \quad f = (Z_1 + Z_s)K_c - jX_{C\Delta}$$

$$\dot{I}_1 = \gamma \dot{U}; \quad \dot{I}_\Delta = \Delta \dot{U};$$

$$\gamma = \frac{af - cd}{bf - ce} = \frac{(Z_1 + Z_s)K_c - Z_s e^{-j\theta} - jX_1 \cos\theta - jX_{C\Delta}}{[Z_1(Z_1 + 2Z_s) + X_1 \cos^2\theta(X_1 - j2Z_s)]K_c - jX_{C\Delta}(Z_1 + Z_s)};$$

$$\Delta = \frac{bd - ae}{bf - ce} = \frac{Z_1 + Z_s - (Z_s e^{j\theta} + jX_1 \cos\theta)K_c}{[Z_1(Z_1 + 2Z_s) + X_1 \cos^2\theta(X_1 - j2Z_s)]K_c - jX_{C\Delta}(Z_1 + Z_s)}; \quad (6)$$

$$Z_0 = \frac{1}{\gamma \left(1 + j \frac{Z_s}{X_{Ck}} e^{j\theta} - \frac{X_1}{X_{Ck}} \cos\theta \right) + \Delta \left(1 + j \frac{Z_1 + Z_s}{X_{Ck}} \right)}. \quad (7)$$

Принимая $\dot{U} = \text{const}$ как фактор, препятствующий размагничиванию АД при изменении его нагрузки, можно с определенным допуском для предварительных расчетов, определяющих его свойства по сравнению с обобщенным компенсированным АД, принять для расчетов их характеристик сопротивление намагничивающего контура $X_m = \text{const}$; постоянными принимают и другие параметры базового АД 4А71В2.

Вносимые параметры обобщенного компенсированного АД принимаем:

$$X_{C\Delta} = 20; 50; 70; 100; 120; 140 \text{ Ом};$$

$$X_{Ck} = 100; 200; 400; 10^5 \text{ Ом}.$$

При одном из значений $X_{C\Delta}$ проводят перебор всех заданных значений X_{Ck} и при одном X_{Ck} принимают весь ряд $X_{C\Delta}$; $X_{Ck} = 10^5$ Ом для машинного расчета соответствует $X_{Ck} = \infty$ и переводу обобщенного компенсированного АД с $K_c = 1 + X_{C\Delta}/X_{Ck} = 1$ в режим АД при $K_c = 1$.

Для основного варианта расчета обобщенного компенсированного АД принято: $\theta = 30^\circ$, скольжение в процессе пуска при питании от сети с $\dot{U} = 220 \text{ В} = \text{const}$, $0 \leq s \leq 1$

Изменяя один из заданных вносимых параметров (например, при $X_{C\Delta} = 100$, $X_{Ck} = 200$) повторяют расчет для всего диапазона принятых параметров.

За номинальный принимают момент базового двигателя, в данном случае $M_n = 3,74 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и определяют соответствующие ему номинальные скольжения s'_n .

Для определения роли величины и знака угла θ между основной и дополнительной обмотками статора обобщенного компенсированного АД и его влияния на эффективность процессов для 2-3 выбранных значений $X_{C\Delta}$ и X_{Ck} (например, для $X_{C\Delta} = 50, 100$; $X_{Ck} = 100, 200$) расчеты проводят для $\theta = 0; \pm 30^\circ; \pm 60^\circ; \pm 90^\circ; \pm 120^\circ; \pm 150^\circ; 180^\circ$, определяя зависимости $I_{\text{пуск}} = f(\theta)$; $M_{\text{пуск}} = \psi(\theta)$ при $X_{C\Delta}$, $X_{Ck} = \text{const}$.

При $X_{Ck} = 10^5$ Ом ($X_{Ck} = \infty$) и $K_c = 1$ АД получает только один вид внутренней емкостной компенсации с автотрансформаторной схемой на емкость C_Δ .

При $X_{C\Delta} = 0$, $X_{Ck} = \infty$, $\theta = 0$ АД переходит в режим базового двигателя с двумя параллельными соосными обмотками статора (рис. 1, б) с токами $\dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta = \frac{\dot{I}}{2}$, где $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_d}$ – общий ток обмотки статора.

При этом параметрические коэффициенты (6) и полное сопротивление равны:

$$\gamma = \Delta = \frac{1}{2(Z_{10} + Z_S)}, \quad Z_d = \frac{1}{\gamma + \Delta} = Z_{10} + Z_S \quad (8)$$

где $Z_{10} = R_{10} + jX_{10}$, $R_{10} = 2R_1$, $X_{10} = X_1$ – параметры обмотки статора АД.

Уравнения системы (1) электрического равновесия для АД представляют вид:

$$\begin{cases} \dot{U} = -\dot{E}_1 + iZ_{10}; \\ \dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jX_m(\dot{i}_1 + \dot{i}_2); \\ 0 = -\dot{E}_2 + \dot{i}_2 Z_2. \end{cases} \quad (10)$$

Откуда $\dot{i} = \frac{\dot{U}}{Z_d}$, при $Z_d = Z_{10} + Z_s$, $Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2$,

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -\dot{U} + iZ_{10}, \quad \dot{i}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2}.$$

Сравнение АД с обобщенным и компенсированным АД по зависимостям токов $\left[I_1, I_\Delta = \frac{I}{2} = \varphi(S) \right]$, моментов $M = \frac{mI_2^2 R_2}{\omega_0 S} = \varphi(S)$, потерь мощностей в обмотках $\Delta p_m = (I_1^2 + I_\Delta^2)R_1 + I_2^2 R_2 = f(S)$ проводят и по другим показателям.

Выводы. Результаты расчета и опыт подтверждают эффективность внутренней емкостной компенсации реактивной мощности АД. За счет сочетания электрической и электромагнитной связи между обмотками статора, включенными по схеме поворотного автотрансформатора на электрическую емкость, на 8-10 % уменьшаются рабочие токи I_1, I_Δ , приближаясь к их активным составляющим; на 15-20 % снижаются потери мощности в обмотках; на 20-25 % увеличивается пусковой момент. При опережающем характере тока I_Δ и отстающем I_1 внутренний $\cos\varphi$ двигателя приближается к единице. Расход реактивной мощности на повышение $\cos\varphi$ на 30-40 % меньше, чем в АД с внешней компенсацией. Двигатель становится энергосберегающим с перспективой его широкого использования в промышленности и сельском хозяйстве.

Список литературы: 1. *Вольдек А.И.* Электрические машины / Л.: Энергия, 1974. – 840 с. 2. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей – М.-Л.: ГЭИ, 1963. – 523 с. 3. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / *А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф* и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с. 4. *Мишин В.И., Лут Н.Т.* Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулируемыми характеристиками // *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*. – № 17. – Харків – 2001. – С. 110-112. 5. Методика розрахунку характеристик компенсованого асинхронного двигуна. / *Мишин В.І., Чуєнко Р.М., Міклін О.А.* – Київ – 2005, НАУ. – 31 с.

Поступила в редколлегию 24.02.2009