

## РАСЧЕТ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗЫ ВПИТАЮЩЕЙ ЦЕПИ

*Сивокобыленко В. Ф.,  
Асдо Талед Ахмед*

В системах электроснабжения с двигательной нагрузкой довольно часто возникают режимы работы, когда имеет место несимметрия фазных и линейных напряжений. Несимметричные напряжения можно разложить на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для асинхронных двигателей (АД) наибольшую опасность представляют напряжения обратной последовательности, уровень которых не должен превышать 2% от номинального напряжения, так как они вызывают дополнительный нагрев обмоток статора и ротора, что может привести к выходу обмоток из строя.

Представляет интерес метод определения потерь в меди обмоток статора и ротора и в стали (потерь намагничивания) АД при наличии и отсутствии несимметрии в питающей сети.

На напряжениях 6-10 кВ используются, как правило, глубоководные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Параметры таких двигателей из-за эффекта вытеснения тока существенно нелинейны и зависят от частоты тока в роторе, уровня напряжения и др., что необходимо учитывать при определении потерь в двигателе.

Методам определения параметров схем замещения указанных двигателей по исходным каталожным данным посвящены работы [1, 2], в которых предложено ротор представлять эквивалентным двухклеточным, а потери в стали не учитывать, пренебрегая активным сопротивлением ветви намагничивания.

В данной работе ставится задача разработки метода расчета потерь в асинхронных двигателях в несимметричных и неполнофазных режимах, учитывая эффект вытеснения тока в роторе и потери в стали. В связи с этим сначала определим такие параметры схемы замещения асинхронного двигателя, чтобы рассчитанные по ним номинальный ток статора  $I_N$  (при  $S_N$ ), пусковой ток статора  $I_p$  (при  $S=1$ ), а также момент  $M$  (при  $S_N$ ),  $M_p$  (при  $S=1$ ) и

$M_{max}$  (при  $S_{кр}$ ) и коэффициент полезного действия  $\eta_N$  (при  $S_N$ ) совпали с исходными каталожными данными. Так как схема замещения двигателя механические потери  $\Delta P_{мех}$  не отражает, то заданное значение КПД в расчетах увеличим на величину механических потерь, которые с некоторым приближением примем равными 20% от общих потерь. Для этого искомые параметры

схемы замещения: обмоток статора  $Z_s (R_s, X_s)$ , первой  $Z_{r1} (R_{r1}, X_{r1})$  и второй  $Z_{r2} (R_{r2}, X_{r2})$  параллельно включенных клеток ротора и ветви намагничивания  $Z_m (R_m, X_m)$  будем находить из решения следующей системы нелинейных уравнений (1) с ограничениями (2)

$$M_H - M(U, Z_s, Z_{r1}, Z_{r2}, Z_m, S_H) = 0,$$

$$I_H - I(U, Z_s, Z_{r1}, Z_{r2}, Z_m, S_H) = 0,$$

$$I_p - I(U, Z_s, Z_{r1}, Z_{r2}, Z_m, 1) = 0,$$

$$M_p - M(U, Z_s, Z_{r1}, Z_{r2}, Z_m, 1) = 0,$$

$$M_m - M_{\max}(U, Z_s, Z_{r1}, Z_{r2}, Z_m, S_{\text{кр}}) = 0,$$

$$\Delta P(U, Z_s, Z_{r1}, Z_{r2}, Z_m, S_H) + \Delta P_{\text{мех}} + \eta_H - 1 = 0,$$

$$\text{Re}(Z_{r1}) > 0 \quad \text{Re}(Z_{r2}) > 0 \quad \text{Re}(Z_m) > 0,$$

$$\text{Im}(Z_{r1}) > 0 \quad \text{Im}(Z_{r2}) > 0 \quad \text{Im}(Z_m) > 0.$$

Где

$$Z_d = R_s + jX_s + \left( \frac{1}{\frac{R_{r1}}{S} - jX_{r1}} + \frac{1}{\frac{R_{r2}}{S} - jX_{r2}} + \frac{1}{R_m - jX_m} \right)^{-1}, \quad (3)$$

$$I = \frac{U}{Z_d}; \quad M = \frac{(|I|)^2 \cdot (\text{Re}(Z_d - Z_s))}{\cos \phi_H \cdot \eta_H} \quad (4)$$

Для решения системы уравнений (1) с ограничениями (2) разработана программа расчета на **Mathcad PLUS 6.0**.

В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчета параметров схем замещения для двигателей, каталожные данные, для которых указаны в табл. 1.

Таблица 1 – Каталожные данные асинхронных двигателей ( $U_H=6$  кВ)

| Тип АД           | $P_H$ | $S_H$ | $I_H$ | $I_p$ | $M_p$ | $M_{max}$ | $\cos\phi_H$ | $\eta_H$ |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------------|----------|
|                  | (кВт) |       | (А)   | (ое)  | (ое)  | (ое)      |              |          |
| ВДД 213/54-16    | 1700  | 0,005 | 215   | 5,4   | 1,3   | 2,5       | 0,810        | 0,937    |
| ДАЗО 1914-10/12А | 1500  | 0,005 | 204   | 5,5   | 0,9   | 2,5       | 0,770        | 0,911    |
| АЗ 1346-4        | 800   | 0,01  | 90    | 5,4   | 1,0   | 2,1       | 0,9          | 0,94     |

Таблица 2-Расчетные параметры схемы замещения в относительных единицах

| Тип АД           | $Z_s$          | $Z_{r1}$       | $Z_{r2}$       | $Z_m$          |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| ВДД 213/54-16    | $0,005+j0,093$ | $0,007+j0,163$ | $0,155+j0,143$ | $0,16+j1,89$   |
| ДАЗО 1914-10/12А | $0,005+j0,091$ | $0,007+j0,208$ | $0,07+j0,161$  | $0,166+j1,62$  |
| АЗ 1346-4        | $0,01+j0,093$  | $0,012+j0,228$ | $0,077+j0,139$ | $0,352+j2,993$ |

Отметим, что для всех двигателей получено практически точное совпадение исходных каталожных данных с рассчитанными по найденным параметрам.

При обрыве одной из фаз питающего напряжения токи статора прямой и обратной последовательностей для АД равны между собой, и могут быть найдены путем деления напряжения статора на сумму входных сопротивлений АД для токов прямой и обратной последовательностей.

Первое из этих сопротивлений  $Z_{d1}$  находим по (3), а второе –  $Z_{d2}$  также по (3), при условии замены  $S$  на  $2 - S$ .

Расчет потерь в статоре  $\Delta P_s$ , роторе  $\Delta P_r$  и в стали  $\Delta P_f$  находим, вычислив падения напряжения на роторе  $U_{r1}$ ,  $U_{r2}$  соответственно для схемы замещения токов прямой и обратной последовательностей:

$$U_{r1} = (Z_{d1} - (R_s + jX_s)) \cdot \frac{U}{Z_{d1} + Z_{d2}},$$

$$U_{r2} = (Z_{d2} - (R_s + j X_s)) \cdot \frac{U}{Z_{d1} + Z_{d2}},$$

$$\Delta P_s = \frac{2 \cdot \operatorname{Re}(Z_s) \cdot U^2}{\cos \phi_H \cdot \eta_H \cdot (Z_{d1} + Z_{d2})^2},$$

$$\Delta P_{r1} = \frac{\left[ R_{r1} \cdot \left| \frac{U_{r1}}{\frac{R_{r1}}{S} + j X_{r1}} \right|^2 + R_{r2} \cdot \left| \frac{U_{r1}}{\frac{R_{r2}}{S} + j X_{r2}} \right|^2 \right]}{\cos \phi_H \cdot \eta_H}$$

$$\Delta P_{r2} = \frac{\left[ R_{r1} \cdot \left| \frac{U_{r2}}{\frac{R_{r1}}{2-S} + j X_{r1}} \right|^2 + R_{r2} \cdot \left| \frac{U_{r2}}{\frac{R_{r2}}{2-S} + j X_{r2}} \right|^2 \right]}{\cos \phi_H \cdot \eta_H}$$

$$\Delta P_r = \Delta P_{r1} + \Delta P_{r2},$$

$$\Delta P_f = \frac{R_m \cdot \left| \frac{U_{r1}}{R_m - j X_m} \right|^2}{\cos \phi_H \cdot \eta_H} + \frac{R_m \cdot \left| \frac{U_{r2}}{R_m + j X_m} \right|^2}{\cos \phi_H \cdot \eta_H},$$

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_s + \Delta P_r + \Delta P_f \quad (5)$$

В табл. 3. приведены результаты расчетов потерь для асинхронных двигателей, указанных в табл. 1, 2 при питании их от трансформатора типа ТРДН-32000/110. Рассматривался обрыв одной фазы на высокой стороне питающего трансформатора статора при коэффициенте загрузки двигателей равном единице и при разных значениях сопротивления нулевой последовательности питающей сети.

Таблица 3 – Потери в статоре, роторе, стали и суммарные потери в двигателях при разных значениях напряжения обратной последовательности

| $P_H$<br>(кВт) | $U_2$<br>(%) | $\Delta P_s$<br>(%) | $\Delta P_r$<br>(%) | $\Delta P_f$<br>(%) | $\Delta P_\Sigma$<br>(%) |
|----------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 1700           | 0            | 0,6                 | 0,4                 | 4,9                 | 5,9                      |
|                | 1,9          | 0,6                 | 0,5                 | 5,0                 | 6,1                      |
|                | 9,19         | 0,9                 | 2,0                 | 5,8                 | 8,7                      |
|                | 16,6         | 1,4                 | 5,5                 | 6,9                 | 13,8                     |
|                | 20,5         | 1,8                 | 8,1                 | 7,7                 | 17,6                     |
| 1500           | 0            | 0,6                 | 0,4                 | 7,4                 | 8,4                      |
|                | 1,9          | 0,6                 | 0,4                 | 7,5                 | 8,5                      |
|                | 9,19         | 0,9                 | 1,2                 | 8,3                 | 10,5                     |
|                | 16,6         | 1,4                 | 3,1                 | 9,6                 | 14,2                     |
|                | 20,5         | 1,8                 | 4,5                 | 10,5                | 16,8                     |
| 800            | 0            | 1                   | 0,8                 | 3,9                 | 5,7                      |
|                | 1,9          | 1,1                 | 0,9                 | 4,0                 | 5,9                      |
|                | 9,19         | 1,6                 | 1,9                 | 5,0                 | 8,5                      |
|                | 16,6         | 2,6                 | 4,2                 | 6,2                 | 13,1                     |
|                | 20,5         | 3,4                 | 6                   | 7,1                 | 16,5                     |

Из приведенных данных следует, что с увеличением степени несимметрии питающего напряжения, оцениваемого уровнем напряжения обратной последовательности, резко возрастают потери в роторе. При этом последние имеют максимальное значение, если нейтраль питающего трансформатора разземлена. Суммарные потери в каждом из АД при этом возрастают в 2-3 раза, что может привести к повышенному нагреву обмоток и выходу АД из строя.

Рассмотренная методика позволяет определить потери в АД при наличии несимметрии в питающей сети и предусмотреть соответствующие устройств для защиты от этих режимов.

### Список литературы

1. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин. – Электричество, 1979, №10, С. 12-14.
2. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А., Хенниуи Халид. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных двигателей, Электромеханика и электроэнергетика. Сб. науч. Тр. энергетич. ф-та. – Донецк, ДонГТУ, 1996, С. 9-13.