

МЕТОДЫ ПОДСЧЕТА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ АСИНХРОННЫМИ МАШИНАМИ

Н. В. ЛИСЕЦКИЙ

(Представлено научно-методическим семинаром электромеханического факультета)

В ряде расчетов, связанных с построением графиков реактивной мощности, определением потерь в сетях, определением мощности компенсирующих устройств и т. п., необходимо знать зависимость реактивной мощности, потребляемой асинхронными машинами, от их загрузки. Указанная зависимость должна быть получена как можно точнее, так как асинхронные машины потребляют около 60 % реактивной мощности системы [1].

Наиболее точная зависимость между активной и реактивной мощностями для асинхронных машин может быть получена из круговых диаграмм. Однако этот метод связан с громоздкими графическими построениями, и поэтому им пользуются сравнительно редко. Обычно подсчет реактивной энергии, потребляемой асинхронными машинами, производят по следующей приближенной формуле [1]

$$Q = S_{квa} \left\{ \frac{\alpha_{xx}}{100} \left[0,7 \frac{U}{U_{ном}} + 0,3 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^5 \right] + \frac{x_p}{100} \left(\frac{P}{P_n} \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

где $S_{квa}$ — полная номинальная мощность двигателя в *квa*;

α_{xx} — процент тока холостого хода при номинальном напряжении;

x_p — процент суммарного реактивного сопротивления рассеяния статора и ротора, отнесенного к полной мощности.

Расчет по указанной формуле, как будет показано ниже, дает большие погрешности. В связи с этим целесообразно найти более точную зависимость между активной и реактивной мощностями асинхронной машины, не требующую громоздких построений или вычислений. Такая зависимость может быть получена непосредственно из круговой диаграммы, построенной для уточненной по методу академика М. П. Костенко схемы замещения асинхронной машины с вынесенной на ее зажимы цепью намагничивания. Уточненная схема замещения и круговая диаграмма, построенная для нее, приведены на фиг. 1.

На основании круговой диаграммы фиг. 1 положение концов векторов токов в осях I'_a , I'_p может быть выражено известным уравнением круга

$$I_a^2 + I_p^2 = \frac{U_{\phi}^2}{4x^2}, \quad (2)$$

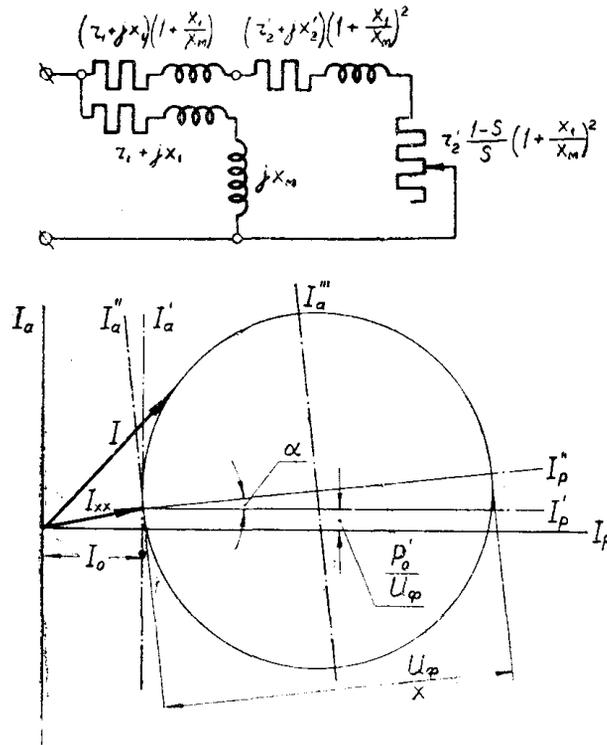
где I_a и I_p — соответственно активная и реактивная составляющие то-
фазе;

U_ϕ — фазное напряжение на зажимах машины;

x — полное приведенное индуктивное сопротивление фазы асинхронной машины с поправками академика М. П. Костенко [2], определяемое из выражения

$$x = x_1 \left(1 + \frac{x_1}{x_M} \right) + x_2' \left(1 + \frac{x_1}{x_M} \right)^2,$$

где x_1 и x_2' — соответственно индуктивные сопротивления рассеяния фазы статора и ротора, приведенные к обмотке статора, x_M — индуктивное сопротивление намагничивающей цепи.



Фиг. 1.

Для получения зависимости $I_p = f(I_a)$ необходимо уравнение (2) привести к осям I_p, I_a (фиг. 1). Для этого сначала переносим ось I_a''' в положение I_a'' (фиг. 1). В осях I_a'', I_p уравнение (2) запишется

$$I_a''^2 + \left(I_p - \frac{U_\phi}{2x} \right)^2 = \frac{U_\phi^2}{4x^2} \quad \text{или}$$

$$I_a''^2 + I_p^2 - 2I_p \frac{U_\phi}{2x} + \frac{U_\phi^2}{4x^2} = \frac{U_\phi^2}{4x^2}.$$

После приведения подобных членов имеем

$$I_a''^2 + I_p^2 - \frac{U_\phi I_p}{x} = 0. \quad (3)$$

Полученное уравнение приводим к осям I'_a, I'_p (фиг. 1), для чего поворачиваем оси координат I''_a, I''_p на угол α в сторону, противоположную вращению векторов; при этом уравнение (3) запишется:

$$(I_a \cos \alpha - I_p \sin \alpha)^2 + (I_a \sin \alpha + I_p \cos \alpha)^2 - \\ - \frac{U_\phi}{x} (I_a \sin \alpha + I_p \cos \alpha) = 0.$$

Преобразуя полученное уравнение, имеем:

$$I_a^2 \cos^2 \alpha - 2 I_a I_p \sin \alpha \cos \alpha + I_p^2 \sin^2 \alpha + I_a^2 \sin^2 \alpha + \\ + 2 I_a I_p \sin \alpha \cos \alpha + I_p^2 \cos^2 \alpha - \frac{U_\phi}{x} (I_a \sin \alpha + I_p \cos \alpha) = 0, \\ I_a^2 + I_p^2 - \frac{U_\phi}{x} (I_a \sin \alpha + I_p \cos \alpha) = 0. \quad (4)$$

Согласно данным академика М. П. Костенко [2]

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 I_o r_1}{U_\phi},$$

где I_o — намагничивающая составляющая тока холостого хода;
 r_1 — активное сопротивление фазы статора и
 U_ϕ — фазное напряжение на зажимах машины.

Угол α будет очень мал ввиду того, что величина падения напряжения в активном сопротивлении статора от намагничивающей составляющей тока холостого хода ($I_o r_1$) много меньше фазного напряжения U_ϕ . На основании этого с достаточной для практики точностью можно считать, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \sin \alpha = \frac{2 I_o r_1}{U_\phi} \quad \text{и} \quad \cos \alpha = 1.$$

При таком допущении уравнение (4) запишется

$$I_a^2 + I_p^2 - \frac{U_\phi}{x} \left(I_a \frac{2 I_o r_1}{U_\phi} + I_p \right) = 0.$$

Сдвигая ось I'_a влево на величину намагничивающей составляющей тока холостого хода I_o , а ось I'_p вниз на величину активной составляющей тока холостого хода $\frac{P'_o}{U_\phi}$ (здесь P'_o — мощность потерь холостого хода, отнесенная к одной фазе), переходим к осям I_a и I_p и получаем аналитическую зависимость, связывающую реактивный и активный ток асинхронной машины

$$\left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} \right)^2 + (I_p - I_o) - \frac{U_\phi}{x} \left[\left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} \right) \frac{2 I_o r_1}{U_\phi} + \right. \\ \left. + (I_p - I_o) \right] = 0. \quad (5)$$

Разделяя переменные и решая полученное квадратное уравнение относительно $(I_p - I_o)$, имеем:

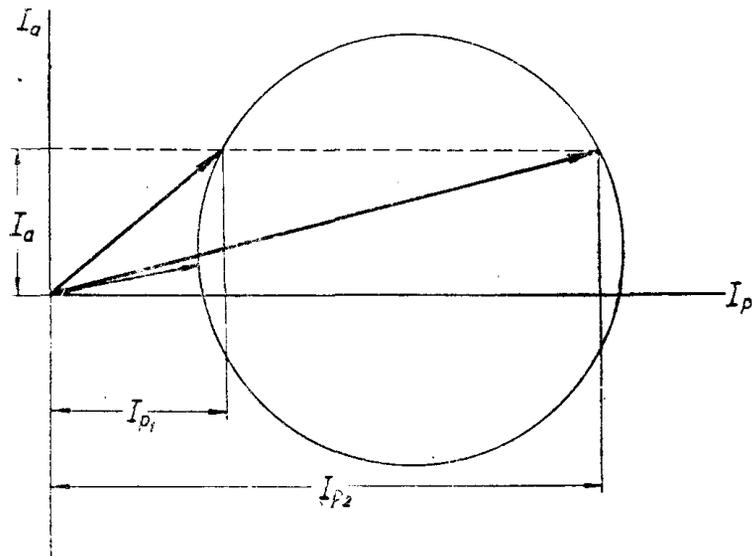
$$(I_p - I_o)^2 - \frac{U_\phi}{x} (I_p - I_o) + \left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} \right) \left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} - 2 I_o \frac{r_1}{x} \right) = 0,$$

$$I_p - I_o = \frac{U_\phi}{2x} \pm \sqrt{\frac{U_\phi^2}{4x^2} - \left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} \right) \left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} - 2 I_o \frac{r_1}{x} \right)},$$

$$I_p = I_o + \frac{U_\phi}{2x} \pm$$

$$\sqrt{\frac{U_\phi^2}{4x^2} - \left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} \right) \left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} - 2 I_o \frac{r_1}{x} \right)}. \quad (6)$$

Как видно из уравнения (6), каждой активной составляющей тока соответствуют два значения реактивной составляющей. Это с физической стороны объясняется векторной диаграммой фиг. 2.



Фиг. 2.

Из фиг. 2 видно, что большее значение реактивной составляющей тока относится к неустойчивому режиму асинхронной машины, поэтому при дальнейшем рассмотрении берем только одно значение, соответствующее устойчивому режиму, а именно:

$$I_p = I_o + \frac{U_\phi}{2x} -$$

$$\sqrt{\left(\frac{U_\phi}{2x} \right)^2 - \left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} \right) \left(I_a - \frac{P'_o}{U_\phi} - 2 I_o \frac{r_1}{x} \right)}. \quad (7)$$

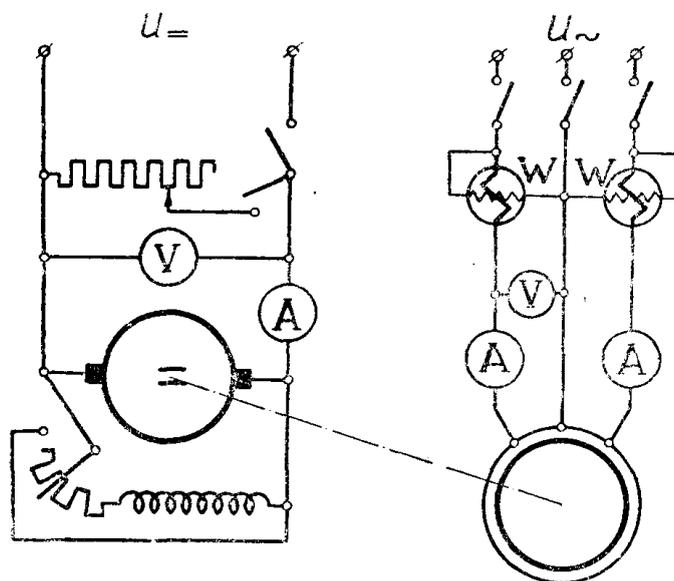
Если теперь правую и левую часть уравнения (7) помножить на $3U_\phi$, получим

$$Q = Q_o + \frac{U^2}{2x} - \sqrt{\left(\frac{U^2}{2x} \right)^2 - (P - P_o) \left(P - P_o - 2Q_o \frac{r_1}{x} \right)}, \quad (8)$$

где Q — полная реактивная мощность, потребляемая машиной;
 Q_0 — реактивная мощность холостого хода;
 U — линейное напряжение, подведенное к машине;
 P_0 — потери активной мощности при холостом ходе;
 P — мощность, потребляемая из сети при работе двигателем и отдаваемая в сеть при работе генератором;
 r_1 — активное сопротивление фазы статора;
 x — полное индуктивное сопротивление рассеяния фазы асинхронной машины, приведенное к обмотке статора, с поправками академика М. П. Костенко.

Для оценки точности уравнений (1) и (8) сравнивались реактивные мощности, подсчитанные по указанным уравнениям, с полученными из опыта. Опыты проводились как для случая работы асинхронной машины двигателем, так и для случая ее работы в генераторном режиме (при отрицательных скольжениях). В качестве подопытного был принят асинхронный двигатель мощностью 2,8 квт на напряжение 380/220 в.

Двигателями, имеющими мощность такого порядка, оборудованы современные многоmotorные станки, применяющиеся во многих отраслях промышленности. Поэтому зависимость между активной и реактивной мощностями, полученная для данного двигателя, в большей мере, чем для более крупной машины, будет соответствовать аналогичной зависимости для целого предприятия.



Фиг. 3.

Для проведения опыта была собрана схема, показанная на фиг. 3. Асинхронная машина запускалась двигателем и нагружалась изменением сопротивления реостата в цепи якоря машины постоянного тока, работающей генератором. Затем машина постоянного тока подключалась к источнику питания и изменением сопротивления в цепи обмотки возбуждения переводилась в двигательный режим. Скорость ее вращения увеличивалась выше синхронной скорости, и этим асинхронная машина переводилась в генераторный режим и отдавала в сеть активную мощность, одновременно потребляя реактивную мощность, необходимую для ее намагничивания.

Активная мощность, потребляемая или отдаваемая асинхронной машиной, при различных режимах и нагрузках измерялась ваттметра-

ми, включенными в цепь статора. Реактивная мощность вычисляется по известной формуле

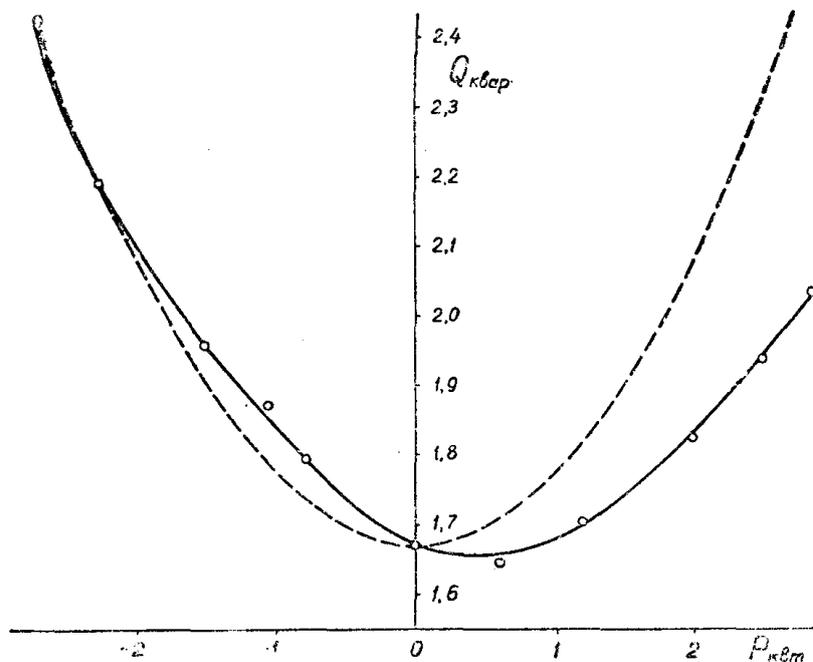
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2},$$

где Q — реактивная мощность, потребляемая из сети;
 P — активная мощность, потребляемая из сети или отдаваемая в сеть;
 S — кажущаяся мощность, равная

$$S = \sqrt{3} UI,$$

где U — линейное напряжение, подведенное к асинхронной машине;
 I — ток, измеряемый амперметрами, в цепи статора.

Кривые, изображенные на фиг. 4, показывают зависимость между активной и реактивной мощностями для асинхронной машины, полученную различными методами. Сплошной линией показана зависимость, полученная при помощи уравнения (8), пунктирной — зависимость, полученная при помощи уравнения (1), и кружками отмечены точки, полученные экспериментальным путем.



Фиг. 4.

Рассматривая кривые фиг. 4, легко заметить, что выражение (1) дает увеличенные значения реактивной мощности при работе асинхронной машины двигателем и уменьшенные значения при работе ее генератором. Наибольшая погрешность в определении реактивной мощности при помощи уравнения (1) получается при номинальной нагрузке асинхронной машины, работающей в режиме двигателя. Для проведенного опыта эта погрешность составила 20 % по отношению к реактивной мощности, определенной из опыта.

Уравнение (8) дает более точные данные по сравнению с уравнением (1), но оно не дает зависимости реактивной мощности холостого хода машины от изменения подведенного к статору напряжения.

Эта зависимость связана с кривой намагничивания, поэтому точное аналитическое выражение ее невозможно. Однако величина реактивной мощности холостого хода составляет 30—40 % от полной реактивной мощности, потребляемой асинхронной машиной [1], и изменяется в зависимости от напряжения в пределах 40—170 %, поэтому неучет ее изменения может привести к недопустимо большим ошибкам.

Для практических расчетов указанная зависимость может быть получена на основании уравнения (1) и указаний, данных в литературе [1], и записана следующим уравнением

$$Q_0 = Q_{0н} \left[0,7 \frac{U}{U_n} + 0,3 \left(\frac{U}{U_n} \right)^5 \right] \frac{U}{U_n}, \quad (9)$$

где Q_0 — реактивная мощность холостого хода при напряжении, отличном от номинального;

$Q_{0н}$ — реактивная мощность холостого хода при номинальном напряжении;

U_n и U — номинальное и приложенное к статору машины напряжение.

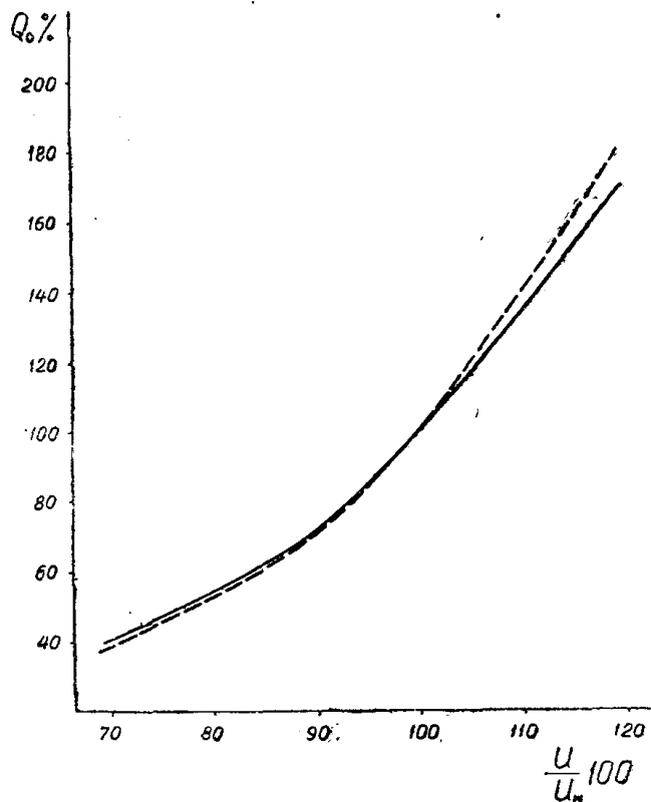
Для проверки точности выражения (9) испытуемый двигатель подключался к изменяющемуся напряжению. Никакой механической нагрузки, кроме трения в подшипниках и о воздух, двигатель не нес. Напряжение на зажимах статора изменялось от 70 до 120 % от номинального напряжения, что соответствовало случаям, имеющим место в практике.

Кривые зависимости реактивной мощности холостого хода асинхронной машины от подведенного напряжения показаны на фиг. 5. Кривая, проведенная сплошной линией, соответствует указанной зависимости, определенной опытным путем. Кривая, проведенная пунктирной линией, показывает аналогичную зависимость, построенную при помощи уравнения (9).

Как видно из кривых фиг. 5, расчетные реактивные мощности холостого хода при снижении напряжения получаются несколько меньшими, чем действительные, а при повышении напряжения несколько большими. Однако расхождение расчетной и экспериментальной кривых в рабочем диапазоне колебаний напряжений весьма незначительно.

На основании всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

На основании всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы.



Фиг. 5.

1. Подсчет реактивной мощности, потребляемой асинхронными машинами, в зависимости от их нагрузки необходимо проводить как можно точнее.

2. Наиболее точную зависимость между активной и реактивной мощностями для асинхронных машин дают круговые диаграммы и выведенное на их основании уравнение (8).

3. При подключении асинхронных машин к напряжениям, отличным от номинальных, или при колебаниях напряжений следует учитывать изменение реактивной мощности холостого хода, что можно сделать при помощи уравнения (9).

4. Уравнением (1) можно пользоваться только для ориентировочных расчетов, не связанных с капитальными сооружениями и режимами работы ответственных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркович И. М. Энергетические системы и их режимы, Госэнергоиздат, 1952.
 2. Пиотровский Л. М. Электрические машины, Госэнергоиздат, 1949.
-