

式(1)和(2)给出了感应电动机定子绕组的电压方程:

$$u_{d,s} = \frac{d\psi_{d,s}}{dt} - \omega_s \psi_{q,s} + R_s i_{d,s} \quad (1)$$

$$u_{q,s} = \frac{d\psi_{q,s}}{dt} + \omega_s \psi_{d,s} + R_s i_{q,s} \quad (2)$$

式(3)和(4)给出了感应电动机转子绕组的电压方程:

$$u_{d,r} = \frac{d\psi_{d,r}}{dt} - s\omega_s \psi_{q,r} + R_r i_{d,r} \quad (3)$$

$$u_{q,r} = \frac{d\psi_{q,r}}{dt} + s\omega_s \psi_{d,r} + R_r i_{q,r} \quad (4)$$

式(5)和(6)给出了感应电动机定子绕组的磁链方程:

$$\psi_{d,s} = L_s i_{d,s} + M_m i_{d,r} \quad (5)$$

$$\psi_{q,s} = L_s i_{q,s} + M_m i_{q,r} \quad (6)$$

式(7)和(8)给出了感应电动机转子绕组的磁链方程:

$$\psi_{d,r} = L_r i_{d,r} + M_m i_{d,s} \quad (5)$$

$$\psi_{q,r} = L_r i_{q,r} + M_m i_{q,s} \quad (6)$$

在机电暂态模型中, 需要忽略定子绕组的电压方程的变压器电势, 再由式(1)可以得到式(7):

$$u_{d,s} = -\omega_s \psi_{q,s} + R_s i_{d,s} \quad (7)$$

在机电暂态模型中, 需要忽略定子绕组的电压方程的变压器电势, 再由式(2)可以得到式(8):

$$u_{q,s} = \omega_s \psi_{d,s} + R_s i_{q,s} \quad (8)$$

按照式(9)定义暂态电势 E'_q :

$$E'_q = \frac{M_m}{L_r} \psi_{d,r} \quad (9)$$

按照式(10)定义暂态电势 E'_d :

$$E'_d = \frac{M_m}{L_r} \psi_{q,r} \quad (10)$$

从式(9)和(10)可知, 感应电动机暂态电势 E'_q 和 E'_d 是分别与转子磁链 $\psi_{d,s}$ 及 $\psi_{q,s}$ 成正比的量.

将式(5)代入式(9), 得到式(11):

$$\begin{aligned} E'_q &= \frac{M_m}{L_r} (L_r i_{d,r} + M_m i_{d,s}) = M_m i_{d,r} + \frac{M_m^2}{L_r} i_{d,s} \\ M_m i_{d,r} &= E'_q - \frac{M_m^2}{L_r} i_{d,s} \\ i_{d,r} &= \frac{1}{M_m} E'_q - \frac{M_m}{L_r} i_{d,s} \end{aligned} \quad (11)$$

将式(6)代入式(10), 得到式(12):

$$\begin{aligned} E'_d &= \frac{M_m}{L_r} (L_r i_{q,r} + M_m i_{q,s}) = M_m i_{q,r} + \frac{M_m^2}{L_r} i_{q,s} \\ M_m i_{q,r} &= E'_d - \frac{M_m^2}{L_r} i_{q,s} \\ i_{q,r} &= \frac{1}{M_m} E'_d - \frac{M_m}{L_r} i_{q,s} \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)和(12)给出了以感应电动机暂态电势和定子电流表示的转子绕组电流.

将式(11)代入式(5), 得到式(13):

$$\begin{aligned}\psi_{d,s} &= L_s i_{d,s} + M_m \left(\frac{1}{M_m} E'_q - \frac{M_m}{L_r} i_{d,s} \right) = L_s i_{d,s} + E'_q - \frac{M_m^2}{L_r} i_{d,s} \\ \psi_{d,s} &= E'_q + \left(L_s - \frac{M_m^2}{L_r} \right) i_{d,s}\end{aligned}\quad (13)$$

将式(12)代入式(6), 得到式(14):

$$\begin{aligned}\psi_{q,s} &= L_s i_{q,s} + M_m \left(\frac{1}{M_m} E'_d - \frac{M_m}{L_r} i_{q,s} \right) = L_s i_{q,s} + E'_d - \frac{M_m^2}{L_r} i_{q,s} \\ \psi_{q,s} &= E'_d + \left(L_s - \frac{M_m^2}{L_r} \right) i_{q,s}\end{aligned}\quad (14)$$

按照式(15)定义暂态电感 L'_s :

$$L'_s = L_s - \frac{M_m^2}{L_r} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13), 得到式(16):

$$\psi_{d,s} = E'_q + L'_s i_{d,s} \quad (16)$$

将式(15)代入式(14), 得到式(17):

$$\psi_{q,s} = E'_d + L'_s i_{q,s} \quad (17)$$

式(16)和(17)给出了以感应电动机暂态电势和定子电流表示的定子绕组磁链方程.

将式(17)代入式(7), 得到式(18):

$$\begin{aligned}u_{d,s} &= -\omega_s (E'_d + L'_s i_{q,s}) + R_s i_{d,s} \\ u_{d,s} &= -\omega_s E'_d + R_s i_{d,s} - \omega_s L'_s i_{q,s}\end{aligned}\quad (18)$$

将式(16)代入式(8), 得到式(19):

$$\begin{aligned}u_{q,s} &= \omega_s (E'_q + L'_s i_{d,s}) + R_s i_{q,s} \\ u_{q,s} &= \omega_s E'_q + \omega_s L'_s i_{d,s} + R_s i_{q,s}\end{aligned}\quad (19)$$

式(18)和(19)给出了以感应电动机暂态电势表示的定子绕组电压方程.

由式(18)可以得到式(20):

$$\begin{aligned}R_s i_{d,s} &= u_{d,s} + \omega_s E'_d + \omega_s L'_s i_{q,s} \\ i_{d,s} &= \frac{1}{R_s} u_{d,s} + \frac{\omega_s}{R_s} E'_d + \frac{\omega_s L'_s}{R_s} i_{q,s}\end{aligned}\quad (20)$$

将式(20)代入式(19), 得到式(21):

$$\begin{aligned}u_{q,s} &= \omega_s E'_q + \omega_s L'_s \left(\frac{1}{R_s} u_{d,s} + \frac{\omega_s}{R_s} E'_d + \frac{\omega_s L'_s}{R_s} i_{q,s} \right) + R_s i_{q,s} \\ &= \omega_s E'_q + \frac{\omega_s L'_s}{R_s} u_{d,s} + \frac{\omega_s L'_s}{R_s} \omega_s E'_d + \frac{(\omega_s L'_s)^2}{R_s} i_{q,s} + R_s i_{q,s} \\ \left[\frac{(\omega_s L'_s)^2}{R_s} + R_s \right] i_{q,s} &= i_{q,s} u_{q,s} - \omega_s E'_q - \frac{\omega_s L'_s}{R_s} u_{d,s} - \frac{\omega_s L'_s}{R_s} \omega_s E'_d \\ \frac{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2}{R_s} i_{q,s} &= (u_{q,s} - \omega_s E'_q) - \frac{\omega_s L'_s}{R_s} (u_{d,s} + \omega_s E'_d) \\ i_{q,s} &= -\frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} (u_{d,s} + \omega_s E'_d) + \frac{R_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} (u_{q,s} - \omega_s E'_q)\end{aligned}\quad (21)$$

将式(21)代入式(20), 得到式(22):

$$\begin{aligned}
i_{d,s} &= \frac{1}{R_s} u_{d,s} + \frac{\omega_s}{R_s} E'_d + \frac{\omega_s L'_s}{R_s} \left[-\frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} (u_{d,s} + \omega_s E'_d) + \frac{R_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} (u_{q,s} - \omega_s E'_q) \right] \\
&= \frac{1}{R_s} u_{d,s} + \frac{\omega_s}{R_s} E'_d - \frac{(\omega_s L'_s)^2}{(\omega_s L'_s)^2 R_s + R_s^3} u_{d,s} - \frac{(\omega_s L'_s)^2}{(\omega_s L'_s)^2 R_s + R_s^3} \omega_s E'_d + \frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} u_{q,s} \\
&\quad - \frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} \omega_s E'_q \\
&= \left[\frac{1}{R_s} - \frac{(\omega_s L'_s)^2}{(\omega_s L'_s)^2 R_s + R_s^3} \right] u_{d,s} + \left[\frac{1}{R_s} - \frac{(\omega_s L'_s)^2}{(\omega_s L'_s)^2 R_s + R_s^3} \right] \omega_s E'_d + \frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} u_{q,s} \\
&\quad - \frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} \omega_s E'_q \\
&= \frac{R_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} u_{d,s} + \frac{R_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} \omega_s E'_d + \frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} u_{q,s} - \frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} \omega_s E'_q \\
i_{d,s} &= \frac{R_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} (u_{d,s} + \omega_s E'_d) + \frac{\omega_s L'_s}{(\omega_s L'_s)^2 + R_s^2} (u_{q,s} - \omega_s E'_q) \tag{22}
\end{aligned}$$

式(21)和(22)给出了以感应电动机暂态电势和定子电压表示的定子绕组电流。

由式(3)可以得到式(23):

$$\begin{aligned}
\frac{M_m}{L_r} u_{d,r} &= \frac{M_m}{L_r} \cdot \frac{d\psi_{d,r}}{dt} - \frac{M_m}{L_r} s \omega_s \psi_{q,r} + \frac{M_m}{L_r} R_r i_{d,r} \\
\frac{M_m}{L_r} u_{d,r} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{M_m}{L_r} \psi_{d,r} \right) - s \omega_s \left(\frac{M_m}{L_r} \psi_{q,r} \right) + \frac{M_m}{L_r} R_r i_{d,r} \tag{23}
\end{aligned}$$

由式(4)可以得到式(24):

$$\begin{aligned}
\frac{M_m}{L_r} u_{q,r} &= \frac{M_m}{L_r} \cdot \frac{d\psi_{q,r}}{dt} + \frac{M_m}{L_r} s \omega_s \psi_{d,r} + \frac{M_m}{L_r} R_r i_{q,r} \\
\frac{M_m}{L_r} u_{q,r} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{M_m}{L_r} \psi_{q,r} \right) + s \omega_s \left(\frac{M_m}{L_r} \psi_{d,r} \right) + \frac{M_m}{L_r} R_r i_{q,r} \tag{24}
\end{aligned}$$

按照式(25)定义电压 $U_{d,r}$:

$$U_{d,r} = \frac{M_m}{L_r} u_{d,r} \tag{25}$$

按照式(26)定义电压 $U_{q,r}$:

$$U_{q,r} = \frac{M_m}{L_r} u_{q,r} \tag{26}$$

将式(9), (10), (11)和(25)代入式(23), 得到式(27):

$$\begin{aligned}
U_{d,r} &= \frac{dE'_q}{dt} - s \omega_s E'_d + \frac{M_m}{L_r} R_r \left(\frac{1}{M_m} E'_q - \frac{M_m}{L_r} i_{d,s} \right) = \frac{dE'_q}{dt} - s \omega_s E'_d + \frac{R_r}{L_r} E'_q - \frac{M_m^2}{L_r} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{d,s} \\
\frac{dE'_q}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r} E'_q + \frac{M_m^2}{L_r} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{d,s} + s \omega_s E'_d + U_{d,r} \tag{27}
\end{aligned}$$

将式(9), (10), (12)和(26)代入式(24), 得到式(28):

$$\begin{aligned}
U_{q,r} &= \frac{dE'_d}{dt} + s \omega_s E'_q + \frac{M_m}{L_r} R_r \left(\frac{1}{M_m} E'_d - \frac{M_m}{L_r} i_{q,s} \right) = \frac{dE'_d}{dt} + s \omega_s E'_q + \frac{R_r}{L_r} E'_d - \frac{M_m^2}{L_r} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{q,s} \\
\frac{dE'_d}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r} E'_d + \frac{M_m^2}{L_r} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{q,s} - s \omega_s E'_q + U_{q,r} \tag{28}
\end{aligned}$$

按照式(29)定义时间常数 T'_{d0} :

$$T'_{d0} = \frac{L_r}{R_r} \quad (29)$$

由式(29)可以得到式(30):

$$\frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{T'_{d0}} \quad (30)$$

由式(15)可以得到式(31):

$$L_s - L'_s = L_s - \left(L_s - \frac{M_m^2}{L_r} \right)$$

$$\frac{M_m^2}{L_r} = L_s - L'_s \quad (31)$$

将式(30)和(31)代入式(27), 得到式(32):

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0}} E'_q + \frac{L_s - L'_s}{T'_{d0}} i_{d,s} + s\omega_s E'_d + U_{d,r} \quad (32)$$

将式(30)和(31)代入式(28), 得到式(33):

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0}} E'_d + \frac{L_s - L'_s}{T'_{d0}} i_{q,s} - s\omega_s E'_q + U_{q,r} \quad (33)$$

式(32)和(33)给出了以感应电动机暂态电势表示的转子绕组电压方程.

d
 d