

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.03.006

# 绕线式异步电动机调压节能运行研究

冯 韧, 王 兵, 侯黎平

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 根据异步电动机带周期性负载运行的特点, 确定了绕线式异步电动机处于空载、轻载运行状态下的最优电压, 且维持负载率不变时, 其在最优电压下的功率因数大于其在额定电压下的。针对绕线式异步电动机的特性, 研究了其转子侧串电阻启动及串电阻调速下调压节能的运行状态, 得知当转子回路中串入  $2\ \Omega$  电阻时, 可加速电机启动, 且在最优电压一定时, 串电阻前后的电磁转矩恒定。通过搭建绕线式异步电动机降压串电阻调速模型, 得出了最优电压下绕线式异步电动机转子短接与转子串电阻时的能耗变化关系, 即电机的负载率为  $0\% \sim 50\%$  时, 适当降低电源电压, 有一定的节能空间。从而验证了最优电压下异步电动机转子串电阻调压轻载下的节能运行是可行的。

**关键词:** 绕线式异步电动机; 最优电压; 调速

**中图分类号:** TM343+.2; TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2016)03-0030-07

## Research on the Operation Performance of Wound Rotor Asynchronous Motors in Voltage Regulation and Energy Saving

FENG Ren, WANG Bing, HOU Liping

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Based on the fact that asynchronous motors are characterized with periodic load operation, the optimal voltage of wound rotor asynchronous motors has been determined under no-load and light-load operating modes. With the load ratio a constant, the power factor under the optimal voltage is greater than that under the rated voltage. In light of the features of winding rotor asynchronous motors, a research has been conducted on the side series resistance starting and the capacity of voltage regulation and energy-saving series under series resistance speed regulation. When a resistance of  $2\ \Omega$  is connected in series with the rotor circuit, an accelerated starting of the motor has thus achieved. With the optimal voltage a constant, the electromagnetic torque remains constant before and after the series resistance has been connected with the rotor circuit. A step-down series resistance speed regulation model of wound rotor asynchronous motors has been set up to work out the relationship between the energy consumption of the rotor turn-on and rotor series resistance under a constant optimal voltage. When the load factor of the motor is in the range of  $0\% \sim 50\%$ , a certain energy-saving space could be obtained by appropriately reducing the power supply voltage, thus verifying the feasibility of the energy saving operation under the light load rotor series resistance voltage regulation of wound rotor asynchronous motors under the optimal voltage.

**Keywords:** wound rotor asynchronous motor; optimal voltage; speed regulation

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 湖南工业大学重点教改课题基金资助项目(2013A12), 湖南省科技厅科技开发基金资助项目(2015C0394)

作者简介: 冯 韧(1989-), 男, 湖北武汉人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电机与电器, E-mail: 1196974510@qq.com

通信作者: 王 兵(1965-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学副教授, 主要从事电机与电器方面的教学与研究,

E-mail: wb1112@126.com

## 0 引言

绕线式异步电动机可以通过滑环在转子绕组回路中串入适当的电阻,以限制电动机的启动电流,增大其启动转矩<sup>[1]</sup>。因此,它被广泛应用于需要重载启动的设备,如桥式起重机、卷扬机、龙门吊车、轧钢机等中。同时,在绕线式异步电动机驱动的工业负载中,有很多负荷的功率曲线在重载、轻载及空载之间发生周期性大幅度变化<sup>[1]</sup>,当负载小于异步电动机额定值的1/3时,即俗称的“大马拉小车”,这时电动机的效率和功率因数都很低,损耗较大。因而,近年来关于轻载、空载的节能问题,越来越受到广大电机技术工作者的重视<sup>[1]</sup>。研究者们认为,考虑变频器价格等因数,对于绕线式异步电动机一般可引入调压节能方案<sup>[2-4]</sup>。

目前,关于异步电动机的矢量控制方面的研究较多<sup>[5-7]</sup>,相应地,学者们提出了较多关于异步电动机调压节能的控制方法,主要有最小工作电流控制、最小有功功率控制、最小功率因数角控制、恒功率因数角控制等。本文主要基于绕线式异步电动机转子串电阻调速运行、不串电阻高速运行这两种工况,对绕线式异步电动机进行调压节能研究。并且针对绕线式异步电动机带周期性负载的特点,在这两种工况下调节定子电压,研究电压对电动机的运行转速、能耗的影响,以期为现实的电机工程技术提供一定的理论参考依据。

## 1 周期性负载下绕线式异步电机的最优电压

异步电动机总的功率损耗主要包括定子铜耗  $p_{Cu1}$ 、转子铜耗  $p_{Cu2}$ 、铁耗  $p_{Fe}$ 、机械损耗  $p_{mec}$  以及杂散损耗(附加损耗)  $p_s$ <sup>[8]</sup>。

在一般的异步电动机等效电路中,其定子铜损、转子铜损和铁心损耗都可以用相应的等效电阻进行描述。

异步电动机的转矩方程为

$$T_L = T_e = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \quad (1)$$

式中:  $T_L$  为负载转矩,  $N \cdot m$ ;

$T_e$  为异步电动机电磁转矩,  $N \cdot m$ ;

$C_T$  为异步电动机的转矩常数;

$\Phi_m$  为每极主磁通,  $Wb$ ;

$I_2 \cos \varphi_2$  为异步电动机转子电流的有功分量,  $A$ 。

由公式(1)可以得知:异步电动机运转中,不同的负载转矩  $T_L$  对应不同的负载电流。对于恒转矩负载,其最优电压就是维持异步电动机电流值不变

的最小电压,该电压既能使电动机损耗最小,又不影响电动机的工作性能。

以异步电动机拖动恒转矩负载时,在不同的负载下,异步电动机的节能效果不同<sup>[1]</sup>。本研究中,基于 Matlab7.0/Simulink 环境搭建了异步电动机带周期性负载的仿真模型,如图1所示。

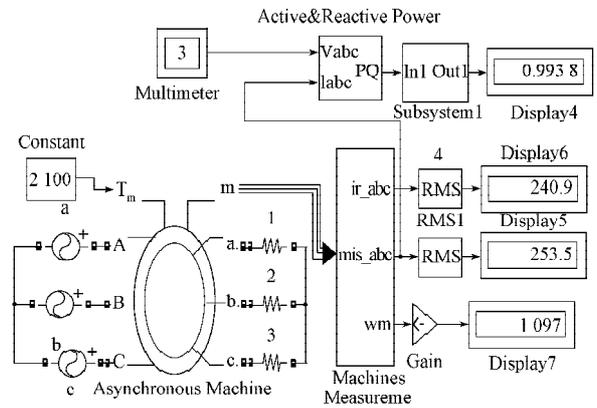


图1 异步电机带周期性负载仿真模型

Fig. 1 Simulation model of asynchronous motors with periodic load

所建立的异步电动机带周期性负载模型中,仿真电机以 330 kW, 6 000 V, 4极交流异步电动机为例,该电动机的具体参数设置如下:定子电阻  $R_s$  为 1.22  $\Omega$ , 转子电阻  $R_r$  为 3.01  $\Omega$ , 励磁电阻  $R_m$  为 4.72  $\Omega$ , 额定转矩  $T_e$  为 6 000  $N \cdot m$ , 定子漏感  $L_{ls}$  为 0.006 H, 转子漏感  $L_{lr}$  为 0.006 H, 互感  $L_m$  为 0.18 H, 额定转差率  $s$  为 0.027, 额定电流  $I_N$  为 132 A。

在周期性负载仿真模型(其中转子侧所串入电阻值设为 0)中,通过改变负载的大小,可以得到电机在额定电压运行状态下的定子电流、转子转速、瞬时功率因数,具体数据见表1。

表1 额定电压下的电流、转速、功率因数数据

Table 1 The data of current, speed and power factor under the rated voltage

负载率 / 相电压 /	定子电流 /	转子电流 /	转速 /	功率	
%	V	A	( $r \cdot \min^{-1}$ )	因数	
0	4 900	59.28	0.03	1 500	0.020 7
5	4 900	59.39	4.72	1 494	0.100 0
10	4 900	59.89	9.43	1 487	0.174 7
15	4 900	60.78	14.15	1 481	0.247 5
20	4 900	62.04	18.89	1 474	0.315 2
25	4 900	63.66	23.65	1 468	0.376 8
30	4 900	65.62	28.42	1 461	0.438 5
35	4 900	67.89	33.22	1 455	0.490 2
40	4 900	70.45	38.04	1 448	0.539 2
45	4 900	73.27	42.87	1 441	0.582 1
50	4 900	76.32	47.73	1 436	0.620 1
55	4 900	79.56	52.60	1 428	0.654 6
60	4 900	83.05	57.51	1 421	0.683 4

在周期性负载仿真模型（其中转子侧所串入电阻值设为0）中，维持异步电动机的负载率不变，并且维持电机定子的电流基本不变，可以得到此条件下应施加的最优电压值。改变负载的大小，仿真所得电机在最优电压运行状态下的定子电流、转子转速、瞬时功率因数，如表2所示。

表2 最优电压下的电流、转速、功率因数数据  
Table 2 The data of current, speed and power factor under the optimal voltage

负载率 / %	相电压 / V	定子电流 / A	转子电流 / A	转速 / (r · min <sup>-1</sup> )	功率因数
0	50	2.30	2.37	1 206.0	0.263 1
5	650	53.24	43.72	827.5	0.858 1
10	1 000	55.78	53.26	1 098.0	0.895 2
15	1 350	60.35	55.18	1 194.0	0.897 2
20	1 750	61.64	58.21	1 271.0	0.886 1
25	2 150	63.32	56.59	1 317.0	0.866 4
30	2 550	65.57	56.68	1 347.0	0.843 3
35	3 000	67.30	55.79	1 373.0	0.809 5
40	3 400	70.17	55.83	1 388.0	0.782 1
45	3 800	73.20	55.98	1 400.0	0.753 5
50	4 200	76.13	56.11	1 410.0	0.724 5
55	4 700	79.41	54.96	1 421.0	0.682 6
60	4 800	82.87	58.77	1 417.0	0.698 4

将表1和表2中的数据进行对比可以得知：在维持异步电动机的负载率不变、定子电流基本不变的情况下，异步电动机在最优电压下的功率因数大于其在额定电压下的功率因数。出现这一结果的主要原因可能是：当异步电动机空载、轻载时，其输出功率减小，从而导致转子铜耗 $p_{Cu2}$ 随之减小；与此同时，由于定子侧电压不变，因而电动机的铁耗 $p_{Fe}$ 、机械损耗 $p_{mec}$ 、杂散损耗 $p_s$ 基本不变；但由于电动机的励磁电流维持不变，使得定子电流减小得较少，定子铜耗 $p_{Cu1}$ 降低不多，最终导致电动机的效率和功率因数下降。在异步电动机轻载时，适当降低其定子端的电压，会使得电动机的励磁电流减小，定子铜耗 $p_{Cu1}$ 明显降低，铁耗 $p_{Fe}$ 也随之减小，从而降低了电动机的总损耗，因而使得异步电动机的效率和功率因数提高。

以上为绕线式异步电动机中转子不串入电阻时，定子侧降压对于异步电动机运行的影响结果，即定子侧降压会使得电动机的效率和功率因数提高。但是针对于绕线式异步电动机的特点，当其转子串电阻时，不仅有助于电动机的启动，也有助于电动机的调速，因此，还需要研究绕线式异步电动机转子串电阻时的工作状况。

## 2 绕线式异步电动机串电阻时的工作状况

### 2.1 转子回路串电阻启动

为了能较为全面地研究绕线式异步电动机的启动过程，建立了一个包含杂散损耗等效电阻<sup>[9]</sup>的异步电机Γ型等效电路，如图2所示。其中， $R_{st}$ 为绕线式异步电动机转子回路串入的可变电阻， $R_{LL}$ 为杂散损耗在转子侧的等效电阻。

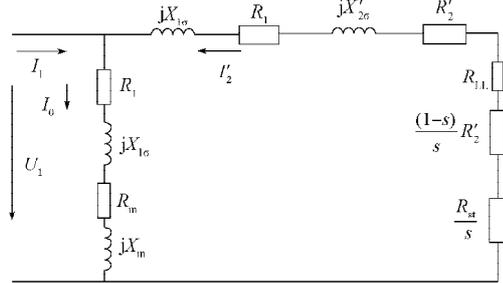


图2 包含杂散损耗的异步电机Γ型等效电路

Fig. 2 An asynchronous electric machine equivalent circuit with the stray losses

图2中的杂散损耗等效电阻 $R_{LL}$ 可以由如下公式计算得出：

$$R_{LL} = \frac{P_{SN}}{3I_2'^2} \quad (2)$$

式中： $I_2'$ 为额定负载时的转子电流；

$P_{SN}$ 为额定负载时的杂散损耗。

在一般情况下，2极交流异步电动机的杂散损耗值为输出功率的2.5%，4极交流异步电动机的杂散损耗值为输出功率的2.0%，6极交流异步电动机杂散损耗值为输出功率的1.5%<sup>[5]</sup>。由此可以得知，本研究中额定负载时的杂散损耗为 $P_{SN}=6.6$  kW。采用文献[6]中异步电机简化等效电路的相关计算公式，可计算得额定负载时的转子电流 $I_2'=30.73$  A。

由式(2)可计算出异步电动机的杂散损耗等效电阻 $R_{LL}$ 为 $2.33 \Omega$ 。

根据对图2的电路分析，可得：

$$U_1 = -I_2' \sqrt{(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2 + \left( R_1 + R_{LL} + \frac{R_2' + R_{st}}{s} \right)^2} \quad (3)$$

$$U_1 = I_0 \sqrt{(X_{1\sigma} + X_m)^2 + (R_1 + R_m)^2} \quad (4)$$

$$I_0 = I_1 + I_2' \quad (5)$$

由式(3)~(5)的等式变换可得

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(X_{1\sigma} + X_m)^2 + (R_1 + R_m)^2}} + \frac{U_1}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2' + R_{st}}{s} + R_{LL} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} \quad (6)$$

式(6)中,  $\sqrt{(X_{1\sigma} + X_m)^2 + (R_1 + R_m)^2}$  为励磁阻抗, 令  $Z_m = \sqrt{(X_{1\sigma} + X_m)^2 + (R_1 + R_m)^2}$ 。由于  $Z_m$  较大, 故在一般情况下有  $I_1 = I_2'$ 。

根据相关文献<sup>[2]</sup>中给出的电机学异步电动机电磁转矩的参数表达式, 可以推导出

$$T_{em} = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R_2' + R_{st}}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left( R_1 + R_{LL} + \frac{R_2' + R_{st}}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2 \right]} \quad (7)$$

式中:  $m_1$  为电源相数;

$p$  为极对数;

$f_1$  为电源频率。

为求得异步电动机的最大电磁转矩, 对公式(7)进行求导, 并且令

$$\frac{dT_{em}}{ds} = 0,$$

则可得发生最大转矩时的转差率  $s_m$  和最大电磁转矩  $T_{max}$ , 分别为:

$$s_m = \frac{R_2' + R_{st}}{\sqrt{(R_1 + R_{LL})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}}, \quad (8)$$

$$T_{max} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 \left[ R_1 + R_{LL} + \sqrt{(R_1 + R_{LL})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \right]} \quad (9)$$

当异步电动机启动瞬间, 其转速  $n=0$  r/min, 此时的转差率  $s_m=1$ , 则由式(8)可以得知, 要使电动机的启动转矩最大, 则应有

$$R_{st} = \sqrt{(R_1 + R_{LL})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} - R_2' \quad (10)$$

根据上文给出的仿真用绕线式异步电动机的相关参数值, 同时令  $X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = 1.884 \Omega$ , 可以计算出使得电动机启动转矩最大的转子电阻, 即  $R_{st} = 2.16 \Omega$ , 本研究中取转子回路串入的电阻为  $2 \Omega$ 。由此可见, 只要绕线式异步电动机的转子回路串入的电阻合适, 就既可以减少启动电流又可以增大启动转矩, 加速电动机启动。

## 2.2 串电阻调速

由公式(9)可以得知, 当绕线式异步电动机的转子回路串电阻时, 电动机的最大电磁转矩不变, 但是最大转矩的转差率  $s_m$  发生了变化。特别是当绕线式异步电动机带动恒转矩负载时, 其转差率  $s$  与转子回路总电阻成正比例关系, 改变电动机转子回路总电阻的值, 就能改变其转差率  $s$ , 进而改变转速  $n$ 。根

据图2, 可以得知电动机在转子回路不串电阻、带恒定负载时有

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s} + R_{LL} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} \quad (11)$$

由公式(8)与(11), 可以得知当转子回路中串电阻  $R_{st}$  时的转子电流, 为了使在两种转差率下转子绕组都能得到充分利用, 应使得两种情况下的转子电流  $I_2'$  相等, 则有

$$\frac{R_2'}{s} = \frac{R_2' + R_{st}}{s_1}, \quad (12)$$

式中  $s_1$  为串电阻后异步电动机的转差率。

由此可得绕线式异步电动机转子回路中串电阻前后的功率因数如下:

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_1 + R_{LL} + \frac{R_2'}{s}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s} + R_{LL} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} = \frac{R_1 + R_{LL} + \frac{R_2' + R_{st}}{s_1}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2' + R_{st}}{s_1} + R_{LL} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} \quad (13)$$

联立公式(1)和(13)可以得知: 当绕线式异步电动机的最优电压一定时, 可认为电动机的主磁通  $\Phi_m$  近似不变, 故在串电阻前后, 异步电动机的电磁转矩相等。在调速过程中, 该处理方法保证了异步电机的带负载能力不变, 表明该调速方式适用于恒转矩调速。

## 3 转子回路短接定子加最优电压能耗分析

对比表1和表2中额定电压与最优电压下绕线式异步电动机的功率因数变化数据, 可以得知当其负载率为0%~60%时, 异步电动机在最优电压下的功率因数均大于其在额定电压下的功率因数, 并且当其负载率为5%~25%时, 电动机最优电压下的功率因数与额定电压下的功率因数差值相对较大, 两者之差为0.758 1~0.489 6; 当其负载率为5%时, 电动机的功率因数相差最大, 两者的差值为0.758 1。

将表1和表2中的数据以及仿真电机的相关参数代入绕线式异步电动机各损耗公式:  $p_{Cu1} = m_1 I_1^2 R_1$ 、 $p_{Cu2} = m_1 I_2'^2 R_2'$ 、 $p_{Fe} = m_1 I_0^2 R_m$ , 可求出电机在各负载下的损耗值<sup>[10-11]</sup>, 所得额定电压与最优电压下的总功率损耗数据具体见表3。

表3 不同电压下异步电机总损耗数据

Table 3 The data of total loss of asynchronous motor under different voltages

负载率 / %	额定电压下		最优电压下	
	电压 / V	总功率损耗 / W	电压 / V	总功率损耗 / W
0	4 900	62 160	50	80
5	4 900	62 400	650	25 710
10	4 900	63 220	1 000	39 110
15	4 900	64 620	1 350	44 230
20	4 900	66 600	1 750	51 440
25	4 900	69 180	2 150	53 060
30	4 900	72 350	2 550	58 070
35	4 900	76 130	3 000	63 170
40	4 900	80 530	3 400	69 880
45	4 900	85 540	3 800	77 520
50	4 900	91 180	4 200	85 960
55	4 900	97 440	4 700	95 780
60	4 900	104 400	4 800	103 800

根据表3中的数据,可得到负载率与节能率之间的关系,见图3。其中负载率为负载转矩与电磁转矩的比例,节能率为损耗的减小值在总损耗中的比例。

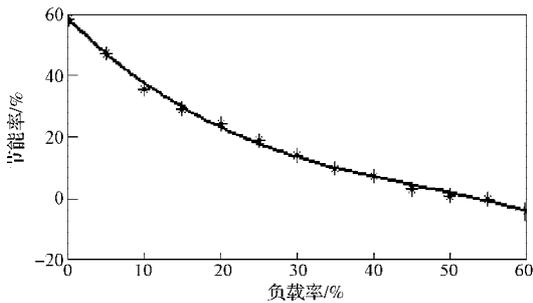


图3 最优电压下的节能率与负载率关系图

Fig. 3 Relationship between energy efficiency and load rate under the optimal voltage

由图3可知:当电动机的负载率为0%~50%时,适当降低电源电压,有一定的节能空间;在负载率为50%~60%的范围内,虽然存在最优电压,但降压节能的空间很小。

### 4 转子串电阻调速轻载下的最优电压能耗分析

通过以上对绕线式异步电动机等效电路的分析,得出转子回路串电阻调速不影响绕线式异步电动机的带负载能力;通过对绕线式异步电动机转子回路短接定子加最优电压下的能耗分析,得出了最优电压下异步电动机转子不串电阻时的节能情况。而为了研究最优电压下异步电动机转子串电阻调速对其轻载能耗的影响,本部分在图1所示异步电动机带周期性负载仿真模型的基础上,搭建交流异步电动机的调压模型,并在最优电压下,以异步电动机拖动

负载的同时,在其转子侧串入电阻进行仿真试验。

由于实际生产中,异步电动机轻载状况一般为额定负载的20%~45%<sup>[1]</sup>,为了验证仿真的实用性,本研究设定负载率为20%,在额定电压下启动,总仿真时间为20 s,且在第5 s时接入最优电压,转子侧串联电阻值为2 Ω,通过仿真得到未串入和串入2 Ω电阻后的电动机转速变化情况,如图4和图5所示。

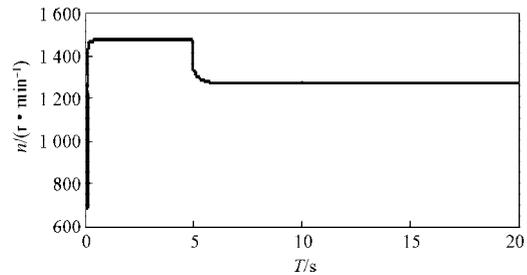


图4 最优电压下转子回路未串电阻时的转速

Fig. 4 The rotational speed of the rotor circuit without series resistance under the optimal voltage

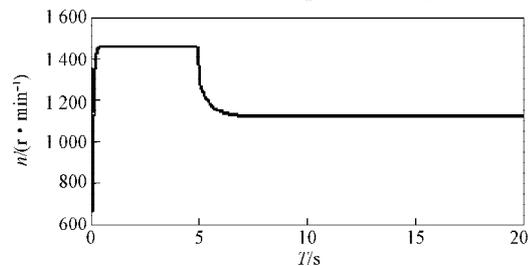


图5 最优电压下转子回路串2 Ω电阻时的转速

Fig. 5 The rotational speed of the rotor circuit with 2 Ω resistance under the optimal voltage

对比图4和5中的转速曲线可知,转子回路串入电阻后,其稳定后的转速值降低。同时,得到了最优电压下绕线式异步电动机转子串入2 Ω电阻后运行的电流、转速、功率因数,具体数据见表4。

表4 最优电压下转子回路串入2 Ω电阻时的仿真数据

Table 4 The simulation data of the rotor circuit with 2 Ω resistance under the optimal voltage

负载率 / %	相电压 / V	定子电流 / A	转子电流 / A	转速 / (r · min <sup>-1</sup> )	功率因数
0	50	2.29	2.13	1 112.0	0.317 3
5	650	46.29	44.48	612.9	0.880 4
10	1 000	56.57	54.01	831.2	0.896 6
15	1 350	60.51	56.95	991.2	0.897 1
20	1 750	63.86	60.12	1 119.0	0.886 0
25	2 150	62.39	53.15	1 195.0	0.866 1
30	2 550	62.63	52.92	1 245.0	0.843 2
35	3 000	71.31	62.61	1 289.0	0.809 7
40	3 400	74.74	61.98	1 314.0	0.781 5
45	3 800	72.15	59.01	1 334.0	0.752 6
50	4 200	78.61	54.19	1 350.0	0.724 9
55	4 700	85.42	63.10	1 369.0	0.682 2
60	4 800	84.50	54.30	1 363.0	0.698 5

将表4中的数据 and 仿真电机的相关参数代入前文给出的损耗公式中, 可求出最优电压下绕线式异步电动机转子回路串入2Ω电阻时的总功率损耗, 具体数据见表5。

表5 转子回路串2Ω电阻时异步电动机的总功率损耗数据  
Table 5 The total loss data of asynchronous motors with 2Ω the resistance connected with the rotor circuit

负载率 / %	最优电压 / V	总功率损耗 / W	负载率 / %	最优电压 / V	总功率损耗 / W
0	50	70	35	3 000	63 470
5	650	23 710	40	3 400	70 980
10	1 000	37 010	45	3 800	76 720
15	1 350	43 730	50	4 200	86 450
20	1 750	50 540	55	4 700	98 780
25	2 150	52 960	60	4 800	108 800
30	2 550	58 460			

根据表3和表5中的总功率损耗数据, 分别得到绕线式异步电动机在额定电压下转子短接与转子串电阻时的损耗曲线、最优电压下转子短接与转子串电阻时的损耗曲线, 如图6所示。

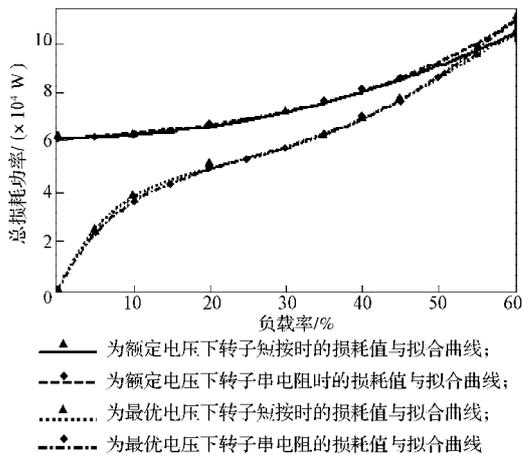


图6 异步电机不同状态下的损耗曲线  
Fig. 6 The loss curve of asynchronous motors under different conditions

由图6可以得知, 在额定电压下, 绕线式异步电动机转子短接与转子串电阻损耗基本一致; 在最优电压下, 绕线式异步电动机转子短接与转子串电阻损耗也基本一致。

对比表3与表5中的数据, 可以得到转子短接与串入2Ω电阻下, 负载率与节能率之间的关系, 如图7所示。由图7可以得知, 在接近空载时, 电动机转子回路短接后的节能率小于转子回路串电阻时的; 而电动机转子回路短接时节能的负载范围大于转子回路串电阻时的。

由表3~5及图6和7可知, 绕线式异步电动机转子回路串电阻调速运行过程中, 调节定子侧电压, 对

于异步电动机有一定的节能效果, 但其节能效果(节能率、功率因数)与最优电压下异步电动机转子短接时相比, 差别不大。

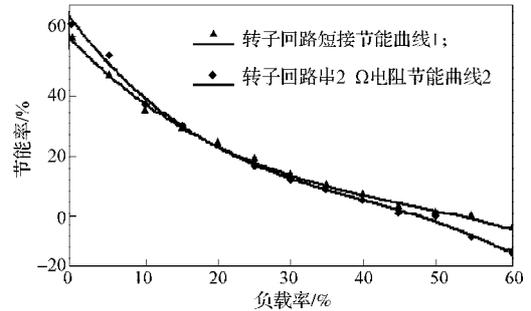


图7 最优电压下节能率与负载率的关系曲线  
Fig. 7 The relation curve of the energy efficiency and the load rate under the optimal voltage

### 5 结论

本文主要基于绕线式异步电动机转子串电阻调速运行、不串电阻高速运行两种情况, 对绕线式异步电动机进行了调压节能研究, 可得到如下结论:

1) 通过对绕线式异步电动机在周期性变工况状态下运行的仿真试验, 得到了不同负载下电动机运行的最优电压, 并从理论上和仿真实验上验证了绕线式异步电动机调压节能运行的可行性。结果表明, 在维持负载率不变、电机定子电流基本不变的情况下, 异步电动机在最优电压下的功率因数大于其在额定电压下的功率因数。绕线式异步电动机转子不串电阻时, 定子侧降压会使得电动机的效率和功率因数提高。

2) 针对绕线式异步电动机的特点, 研究了绕线式异步电动机转子侧串电阻对于电动机启动与速度的影响。结果表明, 绕线式异步电动机的转子回路中串入电阻既可减少启动电流又可增大启动转矩, 加速电机启动。在最优电压一定时, 串电阻前后异步电动机的电磁转矩恒定, 说明在调速过程中, 转子回路中串入适宜电阻(本文选用电机适宜的电阻值为2Ω)保证了异步电动机的带负载能力不变, 表明该调速方式适用于恒转矩调速。

3) 转子回路短接定子加最优电压能耗分析结果表明, 电动机的负载率为0%~50%时, 适当降低电源电压, 有一定的节能空间; 但负载率为50%~60%时, 虽然存在最优电压, 但降压节能的空间较小。

4) 转子串电阻调速轻载下的最优电压能耗分析结果表明, 额定电压下与最优电压下, 绕线式异步电动机转子短接与转子串电阻损耗均基本一致。从而说明调节定子侧电压, 对于异步电动机有一定的

节能效果,但其节能效果(节能率、功率因数)与最优电压下异步电动机转子短接时相比差别不大。

综上所述,所得出的调压下绕线式异步电动机转子短接与转子串电阻时的能耗变化关系,为绕线式异步电动机转子串电阻轻载调压节能提供了参考依据,同时也为绕线式异步电动机调压节能控制器的设计提供了借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 余龙海. 电动机能效与节电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 12-17.  
YU Longhai. Electric Motor Energy Efficiency and Energy-Saving Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 12-17.
- [2] 李彪. 周期性负载条件下异步电动机节能控制器的研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.  
LI Biao. Research on Energy-Saving Controller for Asynchronous Motors Under Periodic Loads[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [3] 刘志鹏. 基于动态电压调节的节能优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.  
LIU Zhipeng. Research on Optimized Methods of Energy Saving Based on Dynamic Voltage Regulator Controlling[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [4] 王翔宇. 电压偏差条件下电动机能耗特性及节能技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
WANG Xiangyu. On the Characteristics of Energy Loss and Energy Saving Technology of Motors Under Voltage Deviation Conditions[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [5] 冯鹏辉, 谭兮, 刘国营, 等. 基于模型参考自适应的异步电机矢量控制系统[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(4): 46-51.  
FENG Penghui, TAN Xi, LIU Guoying, et al. Vector Control of Asynchronous Motor Based on Model Reference Adaptive System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(4): 46-51.
- [6] 艾永乐, 赵荣国, 高子余. 基于模型参考自适应系统理论的异步电机矢量控制系统研究[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(3): 57-59.  
AI Yongle, ZHAO Rongguo, GAO Ziyu. The Vector Control System of Asynchronous Motor Based on Model Reference Adaptive System Theory[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(3): 57-59.
- [7] 刘鹏, 李文峰, 黄钦, 等. 异步电机快速转矩控制研究[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(1): 32-36.  
LIU Peng, LI Wenfeng, HUANG Qin, et al. Research of Fast Torque Control for Asynchronous Motor[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(1): 32-36.
- [8] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011: 237-243.  
GU Chenglin, CHEN Qiaofu, XIONG Yongqian. Electromechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011: 237-243.
- [9] 崔学深, 罗应立, 杨玉磊, 等. 周期性变工况条件下异步电机节能机理和节能途径[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 90-97.  
CUI Xueshen, LUO Yingli, YANG Yulei, et al. Energy Saving Theory and Approach for Asynchronous Motor Under the Periodically Variable Running Condition[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(18): 90-97.
- [10] 宁榕, 李巧莲, 黄坚. 三相异步电动机的杂散损耗研究[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(5): 14-18.  
NING Rong, LI Qiaolian, HUANG Jian. Research on Stray Losses of Three-Phase Asynchronous Motor[J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(5): 14-18.
- [11] 程明, 曹端武, 胡国文, 等. 异步电动机调压节能控制方法研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 6-11.  
CHENG Ming, CAO Duanwu, HU Guowen, et al. Energy-Saving Control Based on Stator Voltage-Regulation of Asynchronous Motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 6-11.

(责任编辑: 廖友媛)

