

基于升降速与惰转研究的风洞高压变频器 制动系统设计

李 猛¹, 陶 实², 纪效波¹

(1. 正泰电气股份有限公司, 上海 201614; 2. 上海澳通韦尔电力电子有限公司, 上海 201401)

摘要: 随着空气动力学研究的深入, 风洞作为空中或者地面交通器的重要实验装备, 在以交通器噪声指标为代表的科学研究和工程设计中发挥越来越重要的作用。高压变频器作为空气动力地面实验台主机的驱动设备, 性能要求较高, 主要体现在转速准确度、转矩响应和制动能力等方面。以风洞主机高压变频驱动装置研究为例, 建立了风洞主机工况模型, 通过升降速和惰转时间研究, 提出了变频器单元能耗制动方案。基于以上工作的模拟实验验证了风洞主机变频器的技术可靠性, 可作为相关产品制动系统方案设计的参考。

关键词: 高压变频器; 风洞; 能耗制动

Design of MV variable frequency drives braking system based on the research of wind tunnel speed

LI Meng¹, TAO Shi², JI Xiaobo¹

(1. Chint Electric Co., Ltd., Shanghai 201614, China;

2. Shanghai Autowell Power Electronics Co., Ltd., Shanghai 201401, China)

Abstract: With the deepening of aerodynamic research, as an important experimental equipment of air or ground vehicles, wind tunnel plays a more and more important role in scientific research and engineering design represented by vehicle noise index. With the deepening of aerodynamic research, as an important experimental equipment of air or ground vehicles, wind tunnel plays a more and more important role in scientific research and engineering design represented by vehicle noise index. As the driving equipment of the main engine of the aerodynamic ground test-bed, the medium voltage driver has high performance requirements, which is mainly reflected in the speed accuracy, torque response, braking capacity and so on. Taking the research on the medium voltage driver of the main engine of the wind tunnel as an example, this paper establishes the working condition model of the main engine of the wind tunnel, and puts forward the energy consumption braking scheme of the frequency converter unit through the research on the lifting speed and idling time. The simulation experiments based on the above work verify the technical reliability of the wind tunnel host frequency converter, which can be used as a reference for the scheme design of the braking system of related products.

Key words: medium voltage variable frequency drives; wind tunnel; energy consumption braking

0 引言

伴随着变频器制动系统的研究与突破,变频器制动在各个领域被广泛应用和推广,通过斩波器和制动电阻,利用设置在直流回路中的制动电阻来吸收电动机的再生电能,实现变频器的快速制动,从而达到目标。

1 分析要求

1.1 风洞运行参数范围

- 1) 稳定段总压 $P_0 = (0.05 \sim 2.5) \times 10^5 \text{ Pa}$ (绝压)。
- 2) 实验段马赫数 $M_a = 0.2 \sim 1.6$ 。
- 3) 实验段总温 $T_0 = 273 \sim 323 \text{ K}$ 。
- 4) 运行介质为空气。
- 5) 风洞设计点参数 $M_a = 0.9$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $P_0 = 2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

1.2 设计任务要求

工作转速范围(实现实验段马赫数调节所需要的工作转速范围)内,在稳定段气流总温 300 K 、总压 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 工况下,主压缩机从零转速至最低工作转速的直接升速时间不大于 30 s ,从最低工作转速至最高工作转速的直接升速时间不大于 90 s ,从最高工作转速至最低工作转速的直接降速时间不大于 90 s ,从最低工作转速至零转速的直接降速时间不大于 60 s 。

2 分析模型

2.1 变工况调节

(1) 变频器调速控制

变频器可以通过输入终止转速(或终止频率)、变转速时间和升速(或降速)步长等参数来控制转速的变化。升速过程,变频器可通过大功率(或大转矩)产生加速度来升速;降速过程,可通过负载转矩降低转速,当负载转速不足以快速降速时,可通过施加制动装置来实现快速降速。

2.2 升速调节基本原理

在实际操作过程中,为保证电动机稳定运

行,选择合适电动机驱动功率来计算升速时间。若增大电动机的驱动功率,则会缩短升速时间。对于变频器操作来说,即输入更大的加速度,升速时间只取决于加速度。

根据设计任务的要求,初步对总温 300 K 、总压 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 工况下马赫数 0.2 和 1.6 的两种工况进行计算。

实际升速的过程是电动机通过大功率(或大转矩)来控制加速度。电动机的总功率为定值,所以对于轴功率越大的工况,电动机所能提供的升速加速度越小,越难实现快速变换。

对于同一台风机,仅转速改变,其性能参数的变化规律遵循一定规律,即轴功率与转速的3次方成正比。根据初始转速与功率值计算出比例系数,即

$$K = \frac{P_0}{n_0^3} \quad (1)$$

式中, n_0 为初始转速,单位为 r/min ; P_0 为初始转速下的轴功率,单位为 kW ; K 为比例系数,无量纲。

在初始转速和终止转速两个转速之间插入若干中间转速值,同时根据比例系数计算出每个插值转速点的功率值,即

$$P = Kn^3 \quad (2)$$

式中, n 为差值转速点或终止转速数值,单位为 r/min ; P 为转速 n 对应下的轴功率值,单位为 kW 。

计算插值转速点的负载转矩为

$$M_z = 9549 \times \frac{P}{n} \quad (3)$$

为保守计算,电动机以满功率($120\,000 \text{ kW}$)进行升速,则可根据式(4)计算出每个差值转速点的驱动转矩为

$$M_e = 9549 \times \frac{240\,000}{n} \quad (4)$$

应用定轴转动微分方程求出每两个插值转速点之间的升速时间,即

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_z \quad (5)$$

式中, J 为转子转动惯量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 为转子旋转角速度,单位为 rad/s ; M_e 为电动机驱动

力矩, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$; M_z 为压缩机的负载阻力矩, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$; $M_e - M_z$ 为加速转矩, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

对所有转速插值点之间时间求和, 可得出升速总时间, 即

$$T = t_1 + t_2 + \dots + t_{i+1} \quad (6)$$

式中, i 为除始末转速外, 插值转速点的个数。

2.3 降速过程基本原理

降速计算中, 相应轴功率(负载功率)和负载转矩越小, 两个工况点间相对应的降速时间越长。实验段总压恒定时, 总温越低, 则相应的轴功率越小, 负载转矩越小。根据各马赫数下的功率进行降速变工况时间计算。

降速过程的计算

$$\frac{1}{2}J\omega_1^2 - \frac{1}{2}J\omega_2^2 = Pt = M_z\omega_z t \quad (7)$$

式中, ω_z 为降速过程中的平均角速度。

2.4 分析输入参数

(1) 分析工况

不同马赫数对应的工况参数见表1。

表1 不同马赫数对应的工况参数

Tab. 1 Working condition parameters corresponding to different Mach numbers

马赫数	转速 / (r/min)	功率 / /MW	扭矩 / /kN·m
0.2	131.32	5.60	406.89
0.3	168.05	10.97	623.62
0.4	204.58	19.19	895.56
0.5	236.21	29.25	1 182.30
0.6	263.76	43.44	1 572.70
0.7	286.72	57.67	1 920.73
0.8	305.60	75.17	2 348.86
0.9	324.47	89.30	2 628.14
1	342.33	106.07	2 958.95
1.1	357.12	115.21	3 080.63
1.2	375.69	127.17	3 232.32
1.3	392.84	142.58	3 465.95
1.4	412.22	156.72	3 630.37
1.5	432.12	172.90	3 820.91
1.6	462.42	196.04	4 048.31

(2) 转动惯量

各部件转动惯量见表2, 总的转动惯量为

$1\,552\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

表2 风动机组转子部件转动惯量

Tab. 2 Rotary inertia of rotor components of pneumatic unit

部件	数量	单件转动 惯量 /kg·m ²	总转动 惯量 /kg·m ²	单件 质量 /t	总质量 /t
压缩机转子	3	251 330	754 000	50.3	180
联轴器	6	1 200	7 200	5	30
空心长轴	3	24 333	73 000	20	60
电动机	2	359 000	718 000	180	360
总体	14	635863	1 552 200	255.3	630

(3) 电动机参数

两台电动机每台电动机功率为120 MW, 总计为240 MW。额定转速324.5 r/min以下为恒转矩区间, 额定转速324.5 r/min以上为恒功率区间。

2.5 模型参数简化

1) 转动惯量初步预估为754 000 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

2) 功率与转速按照3次方比例系数计算。

3) 本次分析只考虑空气工况, 总温为300 K, 总压为 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

4) 恒定转矩阶段升速切换工况按照电动机最大驱动转矩计算。

5) 恒定功率阶段升速切换工况按照电动机最大驱动功率计算。

6) 所有轴承位置都有顶升油装置, 整个转子系统所有轴承在低速阶段(2.5 r/min)时, 摩擦系数按照0.008来计算。

3 升降速与惰转曲线分析

3.1 马赫数1.6降速到0.2

从最高转速到最低转速, 马赫数从1.6到0.2, 主压缩机转速从462.42 r/min到131.32 r/min, 所需时间为40.572 s, 满足90 s的设计要求, 不需要施加制动措施。绘制从最高转速到最低转速的自由惰转曲线。

1) 首先计算转动惯量。总惯量=电动机转子惯量+风机惯量+空心轴惯量+联轴器惯量, 即 $J = J_{\text{rotor}} + J_{\text{fan}} + J_{\text{coupling}} = (718\,000 + 754\,000 + 73\,000 + 7\,200) \text{ kg}\cdot\text{m}^2 = 1\,552\,200 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

2) 采用MATLAB对转速和功率值进行非线性拟合, 得到 $K=2.235\ 9 \times 10e^{-6}$, 即 $P=2.235\ 9n^3 \times 10^{-6}$, 拟合结果如图1所示。

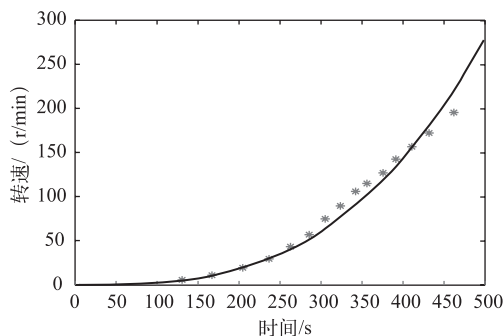


图1 功率-转速关系曲线

Fig. 1 Power speed curve

3) 根据风机负载功率 $P=2.235\ 9n^3 \times 10^{-6}$ 和 $T_{fan}=9\ 549 \times \frac{P}{n}$, 得到全部运行状态（转速0~500 r/min）下的风机转矩 T_{fan} 。多个轴承均分整个系统的质量, 轴承的阻力转矩 $T_{still}=\mu M_{total}gr_{bear}$, 得到在2.5 r/min以下时轴承受到的阻力转矩为 $T_{still}=18\ 844.224\ N \cdot m$, 因此, 风机自由停车时受到的总转矩为 $T_f=T_{fan}+T_{still}$ 。

4) 根据式 $J \frac{d\omega}{dt} = -T_f$ 计算加速度, 进而得出降速时间。图2为最高转速（462.42 r/min）到最低转速（131.32 r/min）的自由惰转曲线。

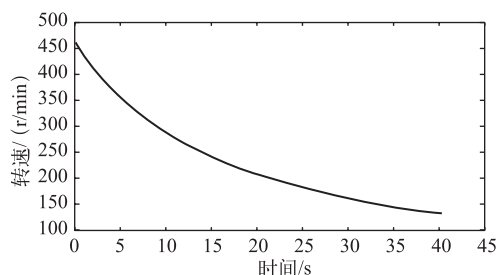


图2 从最高转速到最低转速的降速曲线

Fig. 2 Deceleration curve from maximum speed to minimum speed

3.2 马赫数0.2降速到停车

在有顶升油装置的工况下, 从最低转速到停车时间较长。给出从最低转速到停车（盘车转速）间的惰转曲线。从131.32 r/min到0约需

要345.517 s。不满足60 s的设计要求, 需要施加制动措施来保证惰转时间。图3为最低转速（131.32 r/min）到停机的自由惰转曲线。

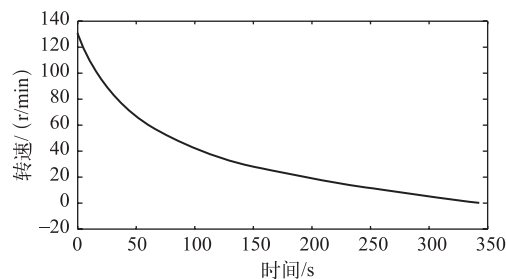


图3 从最低转速到停机的降速曲线

Fig. Deceleration curve from minimum speed to shutdown

4 预估转动惯量的惰转与升速时间

由于电动机参数尚处于初步设计阶段, 其转动惯量等参数后续会有变动, 针对电动机惯量的不同预估倍数, 只考虑电动机转动惯量变化, 其他转子组件转动惯量不变, 预估电动机转动惯量分别为原始电动机转动惯量的1倍、1.5倍和2倍, 原始电动机转动惯量为 $1\ 552\ 200\ kg \cdot m^2$ 。

表3给出了整体转动惯量及升降速时间的对比方案。其中转动惯量单位为 $kg \cdot m^2$, 惰转和升速时间单位为s, V_{max} 表示最高转速, V_{min} 表示最低转速, V_p 表示盘车转速。从表3中可知, 惰转和升速时间与转动惯量成正比, 随着惯量增大, 惰转和升降速时间成正比例增加, 也可根据公式分别对不同电动机转动惯量下的升降速时间进行预估。

表3 整机转子系统惯量与升降速时间预估

Tab. 3 Estimation of inertia and acceleration and deceleration time of complete machine rotor system

电机惯量预估倍数	预估整机转动惯量	惰转时间 $V_{max} \sim V_{min}$	惰转时间 $V_{min} \sim V_p$	升速时间 $0 \sim V_{min}$	升速时间 $V_{min} \sim V_{max}$
1.0	1 552 200	40.572 0	345.517 0	3.084 0	18.682 0
1.5	1 911 200	49.956 0	425.430 0	3.798 0	23.003 0
2.0	2 270 200	59.340 0	505.343 0	4.511 0	27.324 0

其中, 惰转时间由程序计算获得, 没有解析式。

5 制动能力要求

通过上文分析结果判断惰转时间是否满足设计要求，是否需要施加制动措施。表4给出了转子系统不同转动惯量（其中预估电动机转动惯量分别为原始电动机转动惯量的1倍、1.5倍和2倍，原始电动机转动惯量为 $1\,552\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，其他转子部件的转动惯量不变）下从最高转速到最低转速，以及最低转速到零转速的两个阶段的制动方案和制动时间，并对制动装置提出了制动转矩和制动能量的要求。

表4 制动惰转要求和时间预估

Tab. 4 Braking idling requirements and time estimation

预估整机 转动惯量 /kg·m ²	制动惰转 ($V_{\max} - V_{\min}$)			制动惰转($V_{\min} - 0$)			预估总制动 能量 /MJ
	起始	制动	惰转	起始	制动	惰转	
	转速	转矩	时间	转速	转矩	时间	
	/ (r/min)	/ N·m	/s	/ (r/min)	/ N·m	/s	
1 552 200	-	0	40.572 0	131.32	242 010	60	1 819.902 611
1 911 200	-	0	49.956 0	131.32	319 899	60	2 240.81 811
2 270 200	-	0	59.340 0	131.32	398 967	60	2 661.733 609

6 主风机转子系统升降速与惰转时间分析结论

对主风机转子系统的升降速和惰转时间进行初步分析，得出如下分析结论。各个工况的升降速时间见表5。

表5 不同流量工况下的升速和惰转时间

Tab. 5 Acceleration and idling time under different working conditions

过程	计算 时间 /s	要求时间 /s	是否满足 要求
最高转速降速到最低转速	40.572	90	是
最低转速到盘车转速	345.517	60	否

7 风机主机高压变频器能耗制动方案

7.1 能耗制动模型

根据以上分析，选择能耗制动工作方式，按照高压变频器的原理与结构特点，功率单元能耗制动系统原理与制动单元仿真构建如图4和图5

所示。

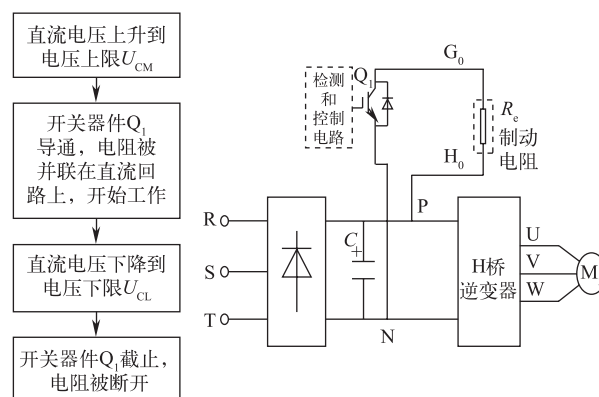


图4 变频器能耗制动单元原理

Fig. 4 Principle of energy consumption braking unit of frequency converter

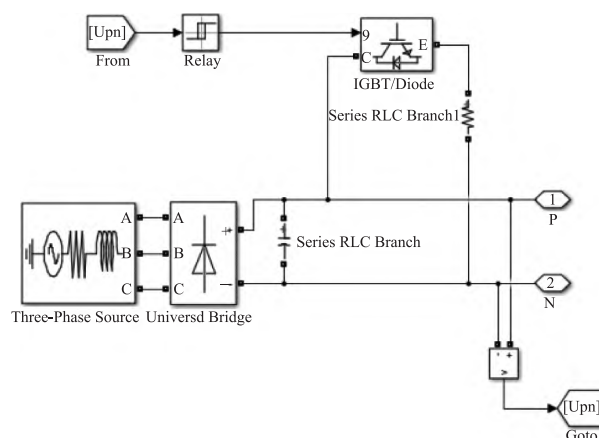


图5 制动单元仿真

Fig. 5 Brake unit simulation

7.2 参数确定

(1) 泵升电压的确定

由于变频器输入的三相线电压 U_L 约为 $1\,350\text{ V}$ ，经变频器整流电路三相桥式整流后，整流电压的平均值 $U_C=1.35U_L$ ，即 $1\,800\text{ V}$ 。

整机转子系统惯量与升降速时间预估上限：泵升电压必须低于主电路电容器和功率器件的电压定额，其上限一般可按 $130\%U_{C0}$ （ U_{C0} 为正常运行时电容 C 上的电压值）选取，即 $U_{CH}=130\%U_{C0}=1.3\times 1\,755\text{ V}=2\,281.5\text{ V}\approx 2\,282\text{ V}$ 。

下限：当泵升电压下降到正常值以内后，为使系统能再次迅速电动运行，不使直流侧电压降得过低，泵升电压必须等于或略大于正常运

行时的 U_{C0} ，一般可选择110% U_{C0} 作为下限，即 $U_{CL}=110\% U_{C0}=1.1 \times 1\,755\text{ V}=1\,930.5\text{ V}$ 。

在选择制动电路的下限时，需要考虑电网波动的影响。设电网波动为 $\pm 15\%$ ，则三相整流后电力电容器上的最大直流电压约为2 019 V。在制动运行时，直流电压的最低值应该不低于2 019 V，故令 $U_{CL}=2\,019\text{ V}$ 。

(2) 外接制动电阻的计算

拖动系统的制动过程就是电动机的制动转矩(T_B)克服系统的惯性(GD^2)，在规定的减速时间 t_B 内，使系统从高转速 n_1 快速下降到低转速 n_2 的过程。电动机制动转矩为

$$T_B = \frac{(GD_M^2 + GD_L^2)(n_1 - n_2)}{375t_B} - T_L \quad (8)$$

式中， GD_M^2 为电动机的飞轮转矩， $N \cdot m^2$ ； GD_L^2 为负载折算到电动机轴上的飞轮转矩， $N \cdot m^2$ ； T_L 为负载折算到电动机轴上的转矩， $N \cdot m$ 。

电动机克服自身的空载损耗，产生空载转矩 T_{B0} ，其大小约为电动机额定转矩 T_{MN} 的20%。所以，在计算制动转矩时，要减去电动机自身的空载转矩 T_{B0} 。这样实际需要的附加制动转矩为

$$T_{BA} = T_B - T_{B0} = T_B - 0.2T_{MN} \quad (9)$$

如果拖动系统所要求的制动转矩小于 T_{B0} ，则没有必要配用制动电阻和制动单元；如果拖动系统所要求的制动转矩大于 T_{B0} ，则需要配用制动电阻。可直接通过制动转矩求得制动电阻为

$$R_B = \frac{U_C^2}{0.104\,7T_{BA}n_1} \quad (10)$$

式中， U_C 为直流回路电压。

工程中由于电动机和负载的飞轮转矩难以得到，故不常采用以上方法。经分析发现再生电流经三相全波整流后的平均值约等于其峰值，而所需附加制动转矩中可扣除电动机自身的制动转矩($0.2T_{MN}$)以及在计算直流电压时已经增加了10%的裕量。综合这些因素，可以近似认为：如果通过制动电阻的放电电流等于电动机的额定电流，则所需的附加制动转矩大致能得到满足。实际验证表明：当放电电流等于电动机额定电流的一半时，就可以得到与电动机的额定转矩相等的

制动转矩。因此，外接制动电阻的工程算法可表示为

$$R_B = \frac{U_C}{I_{MN}} \sim \frac{2U_C}{I_{MN}} \quad (11)$$

式中， I_{MN} 为电动机的额定电流。

(3) 外接制动电阻容量的计算

外接制动电阻的耗用功率用 P_{B0} 表示，即

$$P_{B0} = \frac{U_C^2}{R_B} \quad (12)$$

按式(12)选取的电阻可以长期接入电路工作。但实际中制动电阻接入制动电路的时间短暂，其额定功率值可以小于耗用功率值。因此，决定制动电阻功率的原则是：在电阻的温升不超过其额定温升的前提下，应尽量减小其功率值。实际选取时，外接制动电阻功率表达式为

$$P_B = \frac{P_{B0}}{\lambda_B} = \frac{U_C^2}{\lambda_B R_B} \quad (13)$$

式中， λ_B 为外接制动电阻功率的修正系数。

当每次制动时间 $t_B < 10\text{ s}$ 时，可取 $\lambda_B=7$ ；当每次制动时间 $t_B > 100\text{ s}$ 时，可取 $\lambda_B=1$ ；当每次制动时间在两者之间，即 $10\text{ s} < t_B < 100\text{ s}$ 时，则 λ_B 的取值可按图6所示比例算出。

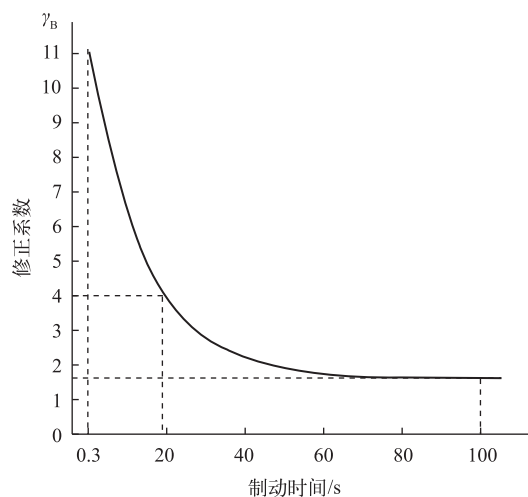


图6 不频繁制动时的修正系数

Fig. 6 Correction factor when braking infrequently

结合以上计算原则得出外接制动电阻参数分别预选择为20 Ω 与40 Ω 。

(4) 模拟测试结论

基于同步电动机搭建模拟测试平台，经实验，励磁电流越大制动效果越好，制动电阻阻值越大制动效果越好，其中效果最好为制动电阻40 Ω ，励磁电流80%时，制动效果提高了98.9%。

制动效率=（自由停车时间-强制制动时间）/自由停车时间

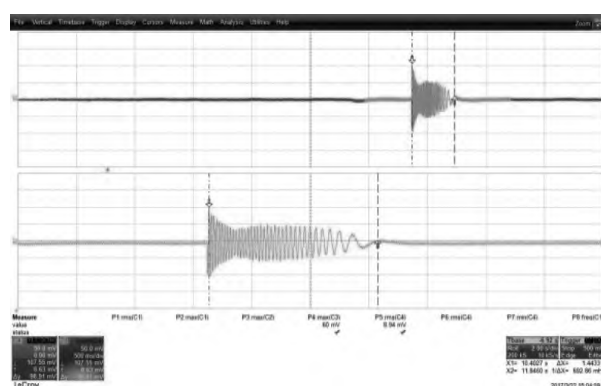
其中，自由停车时间为未加励磁电流和制动电阻停车时间140 s、均给定100%转速情况下。

在80%励磁电流、100%转速下，测试结果对比见表6，实测波形如图7所示，图7a、7b分别对应制动电阻为40 Ω 与20 Ω 的情况。

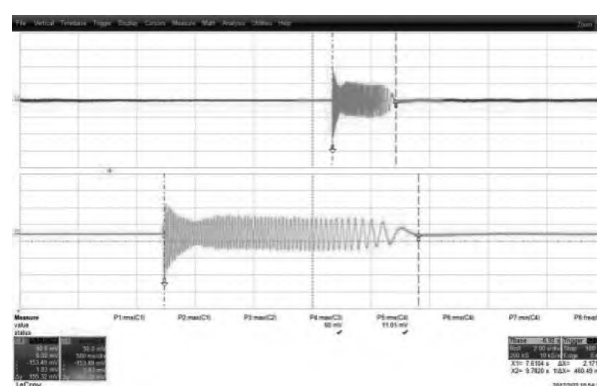
表6 制动效果对比

Tab. 6 Braking effect comparison

制动电阻 / Ω	制动时间 /s	最大电流 /A	平稳电流 /A	最大电流到平稳电流过渡时间 /ms
40	1.44	107	100	250
20	2.17	153	98	280



(a) 制动电阻为40 Ω



(b) 制动电阻为20 Ω

图7 制动实测波形

Fig. 7 Measured waveform of braking

8 结束语

综上所述，励磁电流越大制动效果越好，制动电阻阻值越大制动效果越好，并降低了因制动电阻过热而导致的损坏。为后续风洞高压变频器制动系统发展打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 邓金煌. 变频器制动单元与制动电阻在架空乘人装置的应用[J]. 采矿技术, 2021, 21(增刊1): 158-160.
- [2] 李猛. 基于热仿真的高压变频器单元冷却系统设计[J]. 电工技术, 2021(23): 83-86.

- [3] 魏健. 关于变频器的制动技术分析[J]. 低碳世界, 2018(4): 81-82.
- [4] 童克波. 变频器能耗制动单元的设计及制动电阻算法[J]. 自动化与仪器仪表, 2013(1): 76-78.
- [5] 黄善云, 栗晋杰. 大功率风机电机变频改造的技术经济分析与实践[J]. 有色冶金节能, 2014, 30(4): 41-46.

作者简介

李猛（1978—），男，硕士，工程师、经济师，研究方向为电气自动化产品技术及智能制造。

（收稿日期：2022-04-14）