

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.05.002

引用格式:赵泾霖, 向学位, 李辉, 等. 大惯量负载下交流励磁电机柔性制动策略及参数优化[J]. 重庆大学学报, 2026,49(5): 14-29.



大惯量负载下交流励磁电机柔性制动策略及参数优化

赵泾霖, 向学位, 李辉, 李文东, 李帅

(重庆大学输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要:交流励磁电机具有变速恒频与稳态功率解耦的优点,在抽水蓄能、飞轮储能等场景应用中具有显著优势,然而上述场景往往要求大惯量负载下交流励磁电机具备安全紧急制动能力,传统机械制动策略难以直接应用,因此,提出大惯量负载下交流励磁电机柔性制动策略及控制参数优化方法。首先,结合交流励磁电机转子结构特点,提出转子侧接直流励磁电源、定子侧接多级电阻的柔性制动策略,推导其制动工况下的等效电路。其次,建立以多级制动电阻、转子励磁电流、电阻切换时转速为变量,以电机性能和制动电阻功率为约束,以最短制动时间为目标的制动参数优化模型,并采用遗传算法对模型进行求解;最后,通过 Matlab/Simulink 仿真对多级电阻制动效果与影响因素进行分析,并搭建 7 kW 交流励磁电机实物测试平台进行验证。结果表明,采用多级电阻柔性制动策略能有效缩短制动时间,控制参数优化可以实现系统功率约束下最短制动时间,兼顾制动效果与制动装置经济性。

关键词:交流励磁电机;制动;最短制动时间;优化模型;遗传算法

中图分类号:TM346

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)05-014-16

Flexible braking strategy and parameter optimization for AC excitation motors with high-inertia loads

ZHAO Jinglin, XIANG Xuwei, LI Hui, LI Wendong, LI Shuai

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: AC excitation motors offer advantages such as constant frequency under variable speed and decoupled power in steady-state operation, making them suitable for applications like pumped storage and flywheel energy storage. However, these applications demand rapid emergency braking under high-inertia loads, which traditional mechanical braking strategies fail to meet. This study proposes a flexible braking strategy and parameter optimization method for high-inertia AC excitation motors. First, based on rotor structural characteristics, the strategy connects the rotor to a DC excitation source and the stator to multi-stage resistors, and derives the equivalent braking circuit. Second, a braking parameter optimization model is established, with multi-stage braking resistance, rotor excitation current, and resistor switching speed as variables; motor ratings and resistor

收稿日期:2024-02-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207037)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (52207037).

作者简介:赵泾霖(1998—),男,硕士研究生,主要从事新能源并网运行控制研究,(E-mail)ZhaoJinglin_CQU@163.com。

通信作者:向学位,男,副研究员,主要从事特种电机设计及控制研究,(E-mail)xuweixiang@cqu.edu.cn。

power limits serve as constraints; and the shortest braking time is set as the objective. The model is solved using a genetic algorithm. Finally, multi-stage resistance braking results and influencing factors are analyzed via Matlab/Simulink simulations, and a 7 kW AC excitation motor platform is used to verify the simulations. Results show that the proposed multi-stage flexible braking strategy effectively reduces braking time, and optimized parameters achieve minimal braking duration while satisfying system power constraints, balancing braking efficiency and device economy.

Keywords: AC motors; braking; the shortest braking time; optimization model; genetic algorithms

相较于永磁型电机,交流励磁电机(AC excitation motor, ACEM)具有惯量支撑能力强、变流器容量配置小、直流母线电压等级低、经济性好等特点,在并网运行时采取矢量控制与解耦控制相结合的策略,可以在实现有功功率控制的同时实现无功功率的控制,有助于提高电力系统的稳定性和供电质量,并具备良好的动态特性^[1-2],在抽水蓄能、风力发电、飞轮储能等领域具有显著的应用优势^[3]。

当 ACEM 在大惯量负载下高速运行,变流器发生严重故障无法工作时,特别是大型抽水蓄能^[4]、飞轮储能^[5]场景下,要求在保证安全的前提下尽快降低转速。现有交流励磁电机的制动系统研究主要包括机械制动系统、气动制动系统等。机械制动系统安装于电机与齿轮箱之间,在额定转速范围内投入,通过制动器盘和制动钳承受高速旋转的摩擦力,产生制动力矩^[6-7],但机械制动在电机高速刹车故障时会产生大量热量与火花,可能导致机舱着火^[8-9],造成重大经济损失。气动制动系统则利用空气对叶片的阻力大于叶片所产生的升力,随着升力减小、阻力增大形成制动转矩,但气动制动只能运用在风力发电领域^[10]。目前电制动研究着重于在电网发生故障时运用撬棍电路^[11]或定子侧串联动态制动阻抗的改进方案^[12-13]实现低电压穿越,以及对串联阻抗值等参数进行优化设计^[14-15],但这些方案工作时电机并未离网,同时电阻均是短时投入,不适用于大惯量负载下 ACEM 制动方案设计。

电梯与水力发电领域的紧急制动工况普遍采用柔性电制动。电梯在机械制动器失效时投入封星装置^[16],即定子串联电阻并短接,利用电阻产生暂态制动转矩进行快速降速。Choi 等^[17]、Fomin 等^[18]通过对永磁电机三相对称短路特性及其影响因素进行分析,得到转矩的时域暂态表达式,基于此, Jiang 等^[19]、冯云^[20]提出高速运行时延时投入与串联电容的改进方案来抑制冲击电流与提升制动转矩,但该方案主要利用暂态制动转矩,只能适用于小负载惯量且制动时间极短的场景。大型水轮发电机在停机时先将转速降至额定转速 50%,再采取定子直接短接的电制动方案^[21]降至低速区,最后通过机械制动停机^[22]。丘恩华等^[23]基于水电厂情况分析对比了 3 种电制动方案的特性及其适用场合,但水轮发电机电制动运行转速范围较小,仅利用定子电阻,制动转矩小且降速缓慢,如果在高速时紧急制动采用此方案,会造成定子侧长时间过压、过流、过热等严重问题。上述方案均采用同步电机驱动,不能直接用于大惯量负载下 ACEM 紧急制动。

文中针对大惯量负载下 ACEM 紧急制动工况下快速降速的需求,提出了一种柔性电制动策略与参数优化方法。通过推导电机制动状态下的数学模型,建立以多级制动参数为变量、最短制动时间为目标、电机性能与电阻制动功率为约束的参数配置优化模型,并采用遗传算法对模型进行求解,最后通过仿真与实验对制动策略与优化结果进行分析与验证。

1 ACEM 紧急制动控制策略

1.1 柔性制动策略与电路拓扑

抽水蓄能、飞轮储能场景下交流励磁电机控制系统由驱动电机 ACEM、用于交流励磁控制和功率调控的双 PWM 电压型背靠背变流器和上位机监测系统 3 个部分组成,通过控制转子转速,将电能与机械动能相互转化,实现能量的吸收与释放,系统并网方式为电机定子直接接入电网,转子通过变频器与定子并联接入电网。

紧急制动工况下,变流器发生故障将无法提供励磁,为尽快降速至安全转速范围内,提出一种柔性电制动控制策略,如图1(a)所示。首先,断开定子与电网连接,切换接触器S1将定子接三相制动负载 R_{load} ,再断开转子与变流器的连接,切换接触器S2使转子两相短路接入直流励磁电源提供励磁,旋转磁场切割定子产生感应电动势,负载产生制动功率,提供阻力转矩使转子降速。但在电机初始转速较高时,单级电阻制动通常不能满足降速需求,因此采用定子侧接多级制动电阻来实现快速降速。

传统制动方法通过机械制动器器盘与卡钳产生机械摩擦转矩实现降速,电机转轴与制动器直接相连刚性耦合,在装置出现磨损后会出现制动转矩不稳定,对机械结构造成冲击的缺点。相对于传统方法,该策略利用电磁转矩降速,能通过控制直流电源加载产生稳定的转矩从而实现平稳的降速,是一种柔性制动。

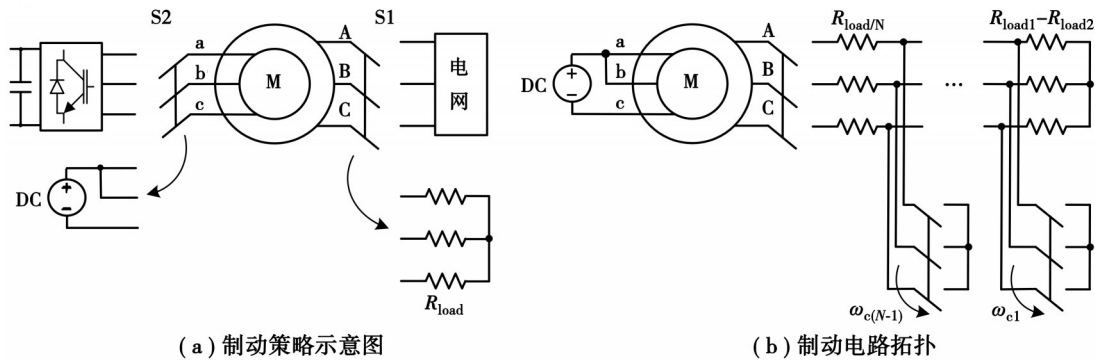


图1 ACEM 紧急制动控制策略

Fig. 1 ACEM emergency brake control strategy

针对多级制动电路拓扑设计,定义制动级数为 $N(N=1,2,\dots)$,定子侧 N 级制动电阻值分别为 $R_{load1}, R_{load2}, \dots, R_{loadN}$,单级制动($N=1$)无切换转速,多级制动($N>1$)电阻切换转速为 $\omega_{c1}, \omega_{c2}, \dots, \omega_{c(N-1)}$,其中 $\omega_{c1} > \omega_{c2} > \dots > \omega_{c(N-1)}$ 。多级制动电阻投入顺序为,电机在初始转速 ω_0 到 ω_{c1} 之间接入 R_{load1} , ω_{c1} 到 ω_{c2} 之间接入 R_{load2} ,依次类推,最终在 $\omega_{c(N-1)}$ 与目标转速 ω_c 之间接入 R_{loadN} 。制动电路拓扑如图1(b)所示,该拓扑基于 $R_{load1} > R_{load2} > \dots > R_{loadN}$,只需配置一套制动电阻,通过短路掉多余部分进行阻值切换,经济性更好,同时在切换过程中定子不会出现断路过程,对定转子和直流电源的冲击更小。

制动降速过程需要保证整个系统安全稳定运行,在实现快速降速的同时电机不能出现过压、过流,制动电阻过载、过温等情况,因此,需要针对转子侧直流励磁电源容量与定子侧制动电阻等配置参数展开研究。

1.2 ACEM 紧急制动数学模型

1.2.1 电压方程

制动工况 ACEM 转子侧接直流电源,定子侧接制动电阻的三相等效电路如图2所示。

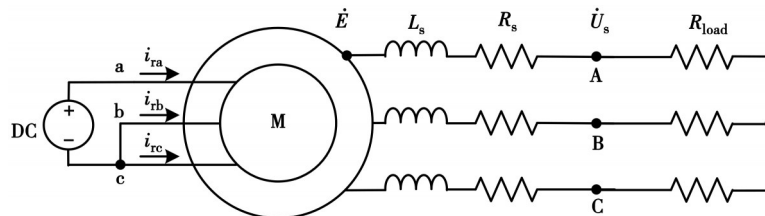


图2 ACEM 紧急制动等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of ACEM in braking procedure

图中: L_s, R_s 分别为交流励磁电机定子侧电感、电阻; \dot{E}, \dot{U}_s 分别为感应电动势、定子端电压相量; R_{load} 为制动电阻; i_{rabc} 为转子侧直流电流。

将其等效到 dq 旋转坐标系中,设同步转速为 ω_1 ,则同步转速坐标系中矢量形式的电压方程为

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + d\psi_s/dt + j\omega_1 \psi_s, \\ U_r = R_r I_r + d\psi_r/dt + j\omega_{slip} \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r, \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r, \end{cases} \quad (2)$$

式中:转子侧变量均已折算到定子侧, U_s 、 U_r 分别为定、转子端电压矢量,有 $U_s = u_{sd} + ju_{sq}$, $U_r = u_{rd} + ju_{rq}$; I_s 、 I_r 分别为定、转子电流矢量,有 $I_s = i_{sd} + ji_{sq}$, $I_r = i_{rd} + ji_{rq}$; ψ_s 、 ψ_r 分别为定、转子磁链矢量,有 $\psi_s = \psi_{sd} + j\psi_{sq}$, $\psi_r = \psi_{rd} + j\psi_{rq}$; $\omega_{slip} = \omega_1 - \omega = \omega_1 - p\omega_r$ 为转差电角速度, ω 为转子电角速度, ω_r 为转子角速度, p 为电机极对数。

根据上述方程可得 dq 轴系下矢量形式的等效电路如图3所示。

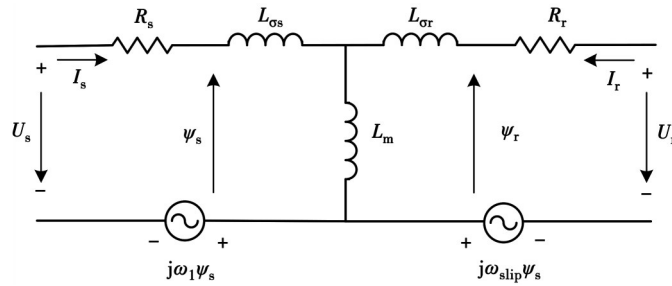


图3 dq 坐标系下 ACEM 制动工况等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit in dq -frame of ACEM in braking procedure

制动工况下转子侧电流是稳定直流电流,可等效为电励磁同步发电机,当定子侧空载时,有

$$\begin{cases} I_s = 0, \\ I_r = \text{constant}, \end{cases} \quad (3)$$

联立式(2),定子磁链可表示为

$$\psi_s = L_m I_r = \text{constant}. \quad (4)$$

因此,式(1)中定子电压可表示为

$$U_s = j\omega_1 \psi_s = j\omega_1 L_m I_r. \quad (5)$$

由此可得,定子空载感应电动势有效值 E_{s0} 与电机转速 ω_r 成正比,即

$$E_{s0} \propto \omega_r. \quad (6)$$

1.2.2 功率方程

在制动过程中转子因受到电磁阻力转矩与制动损耗而降速,制动损耗主要包括电机损耗、风阻损耗、轴承损耗等,其中风阻损耗与轴承损耗均可视作机械摩擦损耗,因此 ACEM 的功率方程可表示为

$$P_{ACEM} = P_{load} + P_M + P_{loss}, \quad (7)$$

式中: P_{ACEM} 为转子制动功率; P_{load} 为制动电阻消耗功率; P_M 为机械摩擦损耗功率; P_{loss} 为电机损耗功率,其中电机转子储存动能为 W ,则转子所受制动功率可表示为

$$P_{ACEM} = -\frac{dW}{dt}. \quad (8)$$

电机机械摩擦的产生与转速相关,机械摩擦损耗功率 P_M 可表示为

$$P_M = T_M(\omega_r) \cdot \omega_r, \quad (9)$$

式中, $T_M(\omega_r)$ 通过拟合 ACEM 自由降速曲线并求导获得转子角加速度,再乘以转子惯量 J 可得。

电机损耗功率 P_{loss} 主要包括定子侧铜耗 P_{Cu} 、铁耗 P_{Fe} 、杂散损耗 P_s ,表示为

$$P_{loss} = P_{Cu} + P_{Fe} + P_s, \quad (10)$$

其中铜耗可表示为

$$P_{Cu} = I_s^2 R_{s0} \quad (11)$$

电机在制动工况下电角速度为 ω 时定子侧单相稳态电路示意图如图4所示。

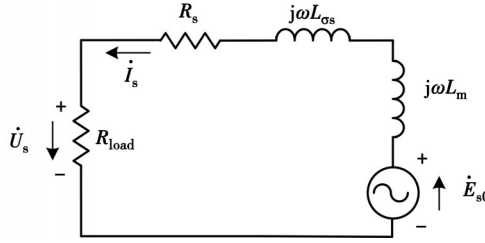


图4 制动工况下定子单相等效电路

Fig. 4 Single-phase equivalent circuit of stator in braking procedure

三相制动电阻与铜耗总消耗功率为

$$P_{load} + P_{Cu} = 3 \frac{E_{s0}^2}{R_{load} + R_s + \frac{(\omega L_{\sigma s} + \omega L_m)^2}{R_{load} + R_s}}, \quad (12)$$

因此,式(7)功率方程可表示为

$$-\frac{dW}{dt} = 3 \frac{E_{s0}^2}{R_{load} + R_s + \frac{(\omega L_{\sigma s} + \omega L_m)^2}{R_{load} + R_s}} + P_{Fc} + P_s + P_{M\circ} \quad (13)$$

1.2.3 运动方程

联立式(8)、(9)、(13),电机的运动方程可表达为

$$-J \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3}{\omega_r} \frac{E_{s0}^2}{R_{load} + R_s + \frac{p^2 \omega_r^2 (L_{\sigma s} + L_m)^2}{R_{load} + R_s}} + T_M(\omega_r) + \frac{P_{Fc}}{\omega_r} + \frac{P_s}{\omega_r} \quad (14)$$

2 基于遗传算法的时间最优制动参数优化

2.1 优化变量与目标函数

为实现在约束条件下的最快降速,建立以最短制动时间为目标,制动配置参数为变量,电机性能与制动电阻功率为约束的多级制动参数配置优化模型。

2.1.1 优化变量

模型优化变量包括:制动电阻取值 $R_{load1} \sim R_{loadN}$,多级($N > 1$)制动切换转速 $\omega_{c1} \sim \omega_{c(N-1)}$,其中单级制动($N=1$)无切换转速,以及转子侧直流电源的电动势比例系数 k_E ,定义为

$$X = [R_{load1} \cdots R_{loadN} \ \omega_{c1} \cdots \omega_{c(N-1)} \ k_E], \quad (15)$$

式中,电动势比例系数 k_E 定义为定子空载感应电动势有效值 E_{s0} 与电机转速 ω_r 的比例系数,该系数的引入基于式(6),其表明感应电动势与转子成正比,为

$$E_{s0} = k_E \omega_r \quad (16)$$

当同步旋转坐标系的 d 轴定向于转子电流矢量 I_r 时,有

$$\begin{cases} i_{rd} = |I_r| = I_r, \\ i_{rq} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

联立式(5),由于在 dq 轴系下矢量采用等幅值变换,而 E_{s0} 为有效值,因此需除以 $\sqrt{2}$,即

$$k_E = \frac{L_m I_r p}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

由图2可知,转子侧直流电流满足

$$i_{ra} = -2i_{rb} = -2i_{rc}, \quad (19)$$

通过Prak变换可得

$$I_r = i_{ra}, \quad (20)$$

联立式(18)可表示为

$$k_E = \frac{L_m i_{ra} p}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

2.1.2 目标函数

优化模型目标函数为整个制动过程降速时间,首先推导定子接电阻 R_{load} ,电机从初始转速 ω_0 降速到目标转速 ω_c 的制动时间,由式(14)电机运动方程可得

$$dt = - \frac{J \omega_r}{3 \frac{E_{s0}^2}{R_{load} + R_s + \frac{p^2 \omega_r^2 (L_{\sigma s} + L_m)^2}{R_{load} + R_s}} + T_M \omega_r + P_{Fc} + P_s} d\omega_r, \quad (22)$$

对式(22)两端求积分,可得制动时间 T_{brake} 表示为

$$T_{brake} = \int_0^t dt = \int_{\omega_c}^{\omega_0} \frac{J \omega_r}{3 \frac{(k_E \omega_r)^2}{R_{load} + R_s + \frac{p^2 \omega_r^2 (L_{\sigma s} + L_m)^2}{R_{load} + R_s}} + T_M \omega_r + P_{Fc} + P_s} d\omega_r \quad (23)$$

基于式(23)可求得采用多级制动策略、以最短制动时间为目标的优化模型目标函数 T ,由于在设计阶段,电机机械摩擦损耗难以准确预估,制动过程的铁耗、杂散损耗同样难以计算,但考虑到摩擦损耗、铁耗与杂散损耗远小于制动电阻与铜耗消耗的功率,忽略这部分损耗对模型影响很小,可简化模型,同时相较于仿真,实物实验时这部分损耗减少的制动时间可留作裕量。

在已知电机定转子参数、最大运行转速 ω_{max} 、安全转速 ω_{safe} 的前提下,将目标函数定义为

$$T = \int_{\omega_{c1}}^{\omega_{max}} \frac{J}{3 \frac{k_E^2 \omega_r}{R_{load1} + R_s + \frac{p^2 \omega_r^2 (L_{\sigma s} + L_m)^2}{R_{load1} + R_s}}} d\omega_r \cdots + \int_{\omega_{safe}}^{\omega_{c(N-1)}} \frac{J}{3 \frac{k_E^2 \omega_r}{R_{loadN} + R_s + \frac{p^2 \omega_r^2 (L_{\sigma s} + L_m)^2}{R_{loadN} + R_s}}} d\omega_r \quad (24)$$

2.2 优化变量约束

优化变量约束分别为取值范围约束与制动过程约束。取值范围约束是对模型优化变量物理意义上的线性约束;制动过程约束指模型求解时,基于ACEM制动电路数学模型对整个制动过程的中间变量提出的要求,是对优化变量的非线性约束。

2.2.1 取值范围约束

目标函数式(24)中模型优化变量 X 的取值约束范围如下。

1) 两级电阻切换转速 ω_c , 约束下限为

$$\omega_{lowerlimit} = \omega_{safe}, \quad (25)$$

式中, ω_{safe} 为电机紧急制动目标安全转速。

约束上限为

$$\omega_{upperlimit} = \omega_{max}, \quad (26)$$

式中, ω_{max} 为电机并网运行最大转速。

2) 制动电阻 R_{load} , 约束下限为

$$R_{lowerlimit} = p \omega_{safe} (L_{\sigma s} + L_m) - R_s \quad (27)$$

根据阻抗匹配原则,当电阻与感抗相等时,电阻消耗功率最大。可知,若制动电阻 R_{load} 小于 $R_{lowerlimit}$,则在制动过程任一转速, R_{load} 消耗功率均小于采用 $R_{lowerlimit}$ 所消耗功率,因此制动电阻最优取值必然大于 $R_{lowerlimit}$ 。

约束上限为

$$R_{upperlimit} = p \omega_{max} (L_{\sigma s} + L_m) - R_s \quad (28)$$

同理,若制动电阻 R_{load} 取值大于 $R_{upperlimit}$,则在制动过程任意转速, R_{load} 消耗功率均小于采用 $R_{upperlimit}$ 所消耗

功率,因此制动电阻最优取值必然小于 $R_{upperlimit}$ 。

3) 电动势比例系数 k_E ,约束下限为

$$k_{lowerlimit} = 0。 \quad (29)$$

约束上限取定子电压约束和转子电流约束的最小值,为

$$k_{upperlimit} = \min \left\{ U_{sN} \sqrt{p^2 \left(\frac{L_m + L_{\sigma s}}{R_{upperlimit}} \right)^2 + \left(\frac{R_{upperlimit} + R_s}{\omega_{max} R_{upperlimit}} \right)^2}, p L_m I_{rN} \right\}。 \quad (30)$$

定子电压约束是考虑电机运行在最大转速 ω_{max} 同时直流励磁取最大的极限情况下,制动电阻取任意值均需满足定子端电压小于额定值 U_{sN} ,即

$$U_s = \frac{k_E \omega_r R_{load}}{\sqrt{\omega^2 (L_m + L_{\sigma s})^2 + (R_{load} + R_s)^2}} \leq U_{sN}, \quad (31)$$

变换形式为

$$k_E \frac{1}{\sqrt{p^2 \left(\frac{L_m + L_{\sigma s}}{R_{load}} \right)^2 + \left(\frac{R_{load} + R_s}{\omega_r R_{load}} \right)^2}} \leq U_{sN}。 \quad (32)$$

由上可知,在同一励磁情况下,电机转速 ω_r 越大,感应电动势越大,因此定子电压约束下的电动势比例系数 k_E 在制动电阻取上限值 $R_{upperlimit}$,转速取上限值 ω_{max} ,定子端电压为额定电压时取得最大值。

转子电流约束是受限于电机转子能承受的最大电流 I_{rmax} ,取转子额定电流值代入式(21)可得转子电流约束下的最大电动势比例系数。

2.2.2 制动过程约束

ACEM制动过程约束主要包括电机性能与电阻制动功率两方面,其中电机性能由电机额定参数决定,制动功率由设计方案中制动电阻柜散热功率决定,要求在制动降速过程中电机定子、转子均不能出现过压、过流,制动电阻过载、过温等危险情况,因此对优化变量的约束描述如下。

1) 制动过程定子侧相电压、相电流均小于电机定子额定相电压、相电流,即

$$\begin{cases} U_s \leq U_{sN}, \\ I_s \leq I_{sN}。 \end{cases} \quad (33)$$

2) 制动过程转子侧相电压、相电流均小于电机转子额定相电压、相电流,即

$$\begin{cases} U_r \leq U_{rN}, \\ I_r \leq I_{rN}。 \end{cases} \quad (34)$$

3) 制动过程中制动电阻消耗功率越大,对电阻过流能力、柜体体积与散热要求越高,经济性越差,需将制动电阻功率限制在合理范围内,即

$$P_{load} \leq P_{limit}。 \quad (35)$$

2.3 遗传算法优化制动参数

为实现ACEM紧急工况下最快降速,文中采用遗传算法(genetic algorithm)对制动配置参数进行寻优。遗传算法是模拟生物遗传进化流程,采用适应度函数对个体进行评估,通过选择、交叉、变异算子进行迭代遗传寻找最优个体,搜索过程以种群形式进行,具备较强的全局搜索能力。

遗传算法的数学模型为

$$SGA = (C, E, P, M, \Phi, \Gamma, \Psi, T), \quad (36)$$

式中: C 为个体的编码方法,常用二进制编码; E 为适应度函数; P 为初始种群; M 为种群大小,即种群中所含个体的数量,取40; Φ 为选择算子; Γ 为交叉算子,交叉概率取0.9; Ψ 为变异算子,变异概率取0.05; T 为遗传运算终止条件,进化代数一般取500。

遗传算法中个体的适应度通过适应度函数进行计算,用于衡量个体在种群中的优势程度,适应度大的个体更有可能获得遗传机会,因此该模型的适应度函数设计为

$$\text{Fit}(X) = -T_o \tag{37}$$

2.3.1 最优参数求解

大惯量负载下 ACEM 电机算例的参数如表 1 所示,其中转子侧参数已经折算到定子侧。

表 1 ACEM 额定参数
Table 1 Rated parameters of ACEM

参数	数值	参数	数值
额定有功功率 P_N/MW	2	极对数 p	2
额定转速 $n_N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 500	转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	4 520
定子额定线电压 U_{sN}/V	690	定转子互感 L_m/mH	0.771
定子电流 I_{sN}/A	2 100	定子漏感 $L_{\sigma s}/\text{mH}$	0.030 2
额定频率 f/Hz	50	转子漏感 $L_{\sigma r}/\text{mH}$	0.036 9
转子电流 I_{rN}/A	670	定子电阻 $R_s/\text{m}\Omega$	0.81
转差率 s	1/10	转子电阻 $R_r/\text{m}\Omega$	0.59

其中,机械摩擦转矩经拟合后设置为

$$T_M = 0.497\omega_r + 4.821\omega_r^{0.667} + 17.367, \tag{38}$$

紧急制动安全转速 n_{safe} , r/min, 设置为

$$n_{\text{safe}} = 30, \tag{39}$$

电阻制动功率上限 P_{limit} , kW, 设置为

$$P_{\text{limit}} = 500. \tag{40}$$

对单级、两级、三级制动策略 ($N=1, 2, 3$) 分别建立上文优化模型对制动参数进行优化设计,根据式(25)~(30),可得优化模型变量约束如表 2 所示。

表 2 优化变量约束区间
Table 2 Model variables and constraint intervals

优化变量	约束区间
$\omega_c/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	[5.236,172.787]
R_{load}/Ω	[0.007 581,0.276 065]
k_E	[0,1.902]

利用遗传算法分别对 3 种制动策略的模型进行优化求解,制动参数优化结果如表 3 所示。

表 3 多级制动优化配置参数
Table 3 Optimized results of multi-stage braking strategy

制动策略	R_{load1}/Ω	R_{load2}/Ω	R_{load3}/Ω	$\omega_{c1}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$\omega_{c2}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	k_E	目标函数 T/s
单级	0.093					1.902	314.446
两级	0.140	0.032		50.265		1.902	244.469
三级	0.140	0.061	0.016	61.784	21.677	1.902	232.752

在制动过程中,电阻短时消耗大量功率会迅速升温引起参数变化,如工程用制动波纹电阻参数标明在额定功率下阻值变化小于等于5%,因此在配置参数时,需综合考虑制动电阻温升与电阻柜散热能力,选取在运行温度时阻值为最优参数的电阻,能最大限度降低温度因素对制动效果的影响。

2.3.2 进化代数合理性验证

在采用遗传算法对上述3种制动策略优化模型的求解过程中,最优个体适应度与群体平均适应度随进化代数的变化如图5所示。

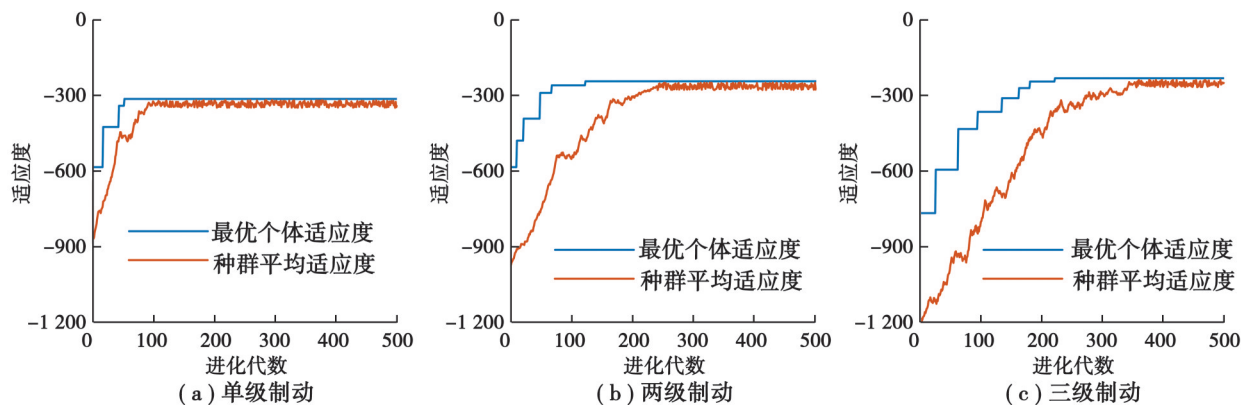


图5 求解过程最优个体与种群平均适应度

Fig. 5 Fitness of best individual and average population in solving

由图5可知,随着进化代数增加,种群最优个体最优适应度与群体平均适应度都趋于增大,在接近最优适应度后变化趋于平缓。

上述求解过程中采用进化代数为500,为验证优化结果满足误差允许范围,即进化代数对优化结果的影响可以忽略,对比进化代数为500与1000的优化结果,如表4所示。

表4 遗传代数无关性验证

Table 4 Verification of genetic generations independence

制动策略	目标函数 T/s		误差/%
	代数500	代数1000	
单级	314.446	314.235	0.067
两级	244.469	244.153	0.129
三级	232.752	232.257	0.213

由表4可知,3种制动策略在进化代数提升后优化结果误差均在1%以内,表明进化代数对优化结果几乎没有影响,进化代数设置为500具备合理性。

3 仿真分析与实验验证

3.1 仿真分析

3.1.1 制动结果分析

在Matlab/Simulink分别搭建单级、两级、三级制动模型进行仿真验证,采取多级制动策略的大惯量负载下ACEM降速曲线仿真结果如图6所示。

由图6可知,相较于单级电阻制动,采用两级电阻制动时间缩短63 s,制动效果提升20.52%,采用三级电阻制动时间缩短77 s,制动效果提升25.08%。相比之下,从单级到两级性能提升20.52%,从两级到三级性能提升5.74%,从两级到三级的提升并不明显。

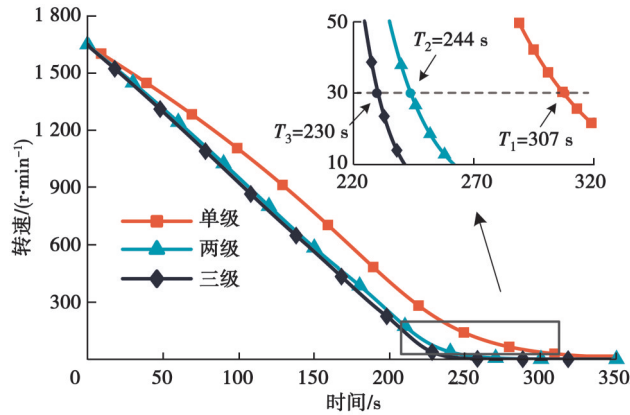


图 6 多级制动策略转速仿真结果

Fig. 6 Simulation results of speed in multi-stage braking strategy

为证明优化模型计算结果的正确性,分别对多级制动策略优化配置参数进行仿真验证,由于模型目标函数并不考虑机械转矩,因此仿真分为转子无机械转矩 T_M 加载与有机械转矩 T_M 加载,分别获得制动时间,结果如表 5 所示。

表 5 多级制动策略制动仿真与计算结果

Table 5 Simulation and calculation results of multi-stage braking strategy

制动策略	目标函数 T/s	仿真-无 T_M 加载/s	与 T 误差/%	仿真-有 T_M 加载/s	与无 T_M 加载误差/%
单级	314.446	326.124	3.580	307.501	5.711
两级	244.469	255.801	4.430	244.029	4.616
三级	232.752	241.125	3.472	230.463	4.421

由表 5 可知,3 种策略的无 T_M 加载制动仿真时间相较于目标函数 T 均慢 10 s 左右,误差在 5% 以内,表明模型目标函数计算结果具备正确性。与无 T_M 加载结果相比,两级、三级制动策略的有 T_M 加载仿真结果快 10 s 左右,单级制动快 19 s,误差在 6% 以内,表明制动策略级数越多、制动时间越短, T_M 对优化结果影响越小,因此在设计阶段制动参数优化模型中不考虑机械转矩具备合理性。

在制动过程中 3 种策略的制动电阻消耗功率与产生的电磁制动转矩仿真结果如图 7 所示,电机转子三相电流,定子 A 相电压、电流幅值仿真结果如图 8~10 所示。

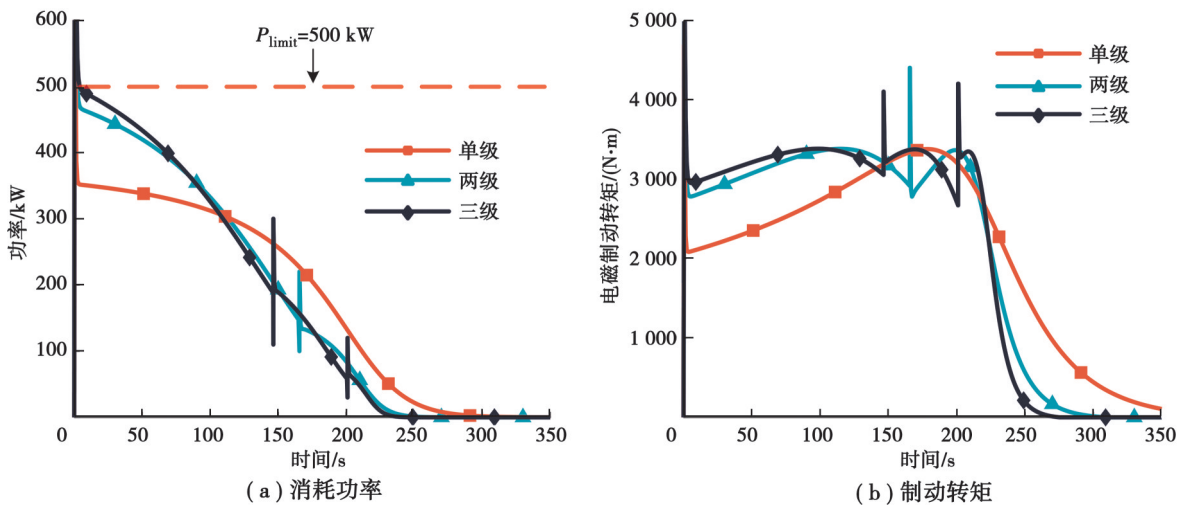


图 7 多级制动策略仿真结果

Fig. 7 Simulation results of multi-stage braking strategy

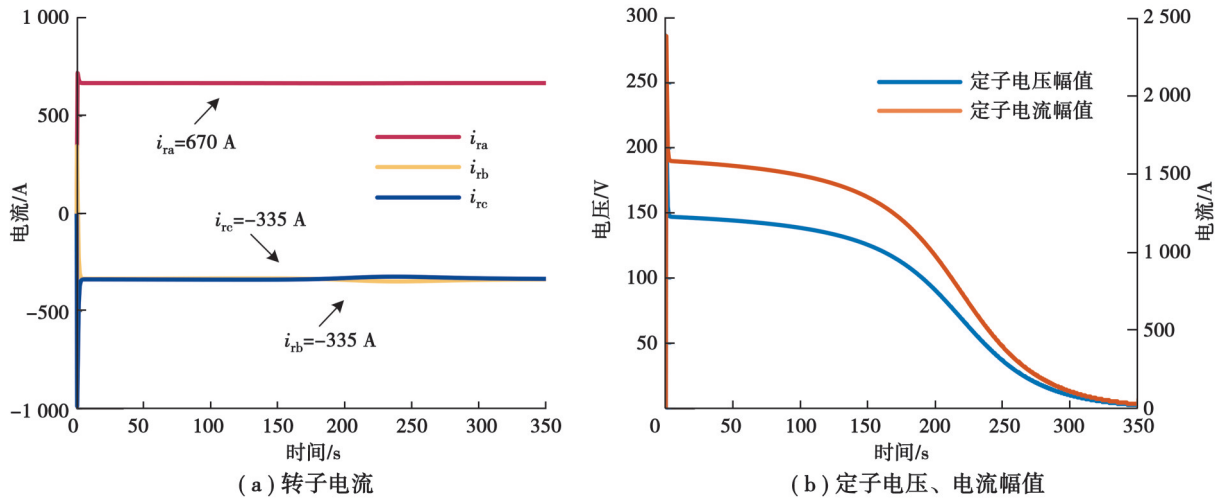


图 8 单级制动策略仿真结果

Fig. 8 Simulation results of one-stage braking strategy

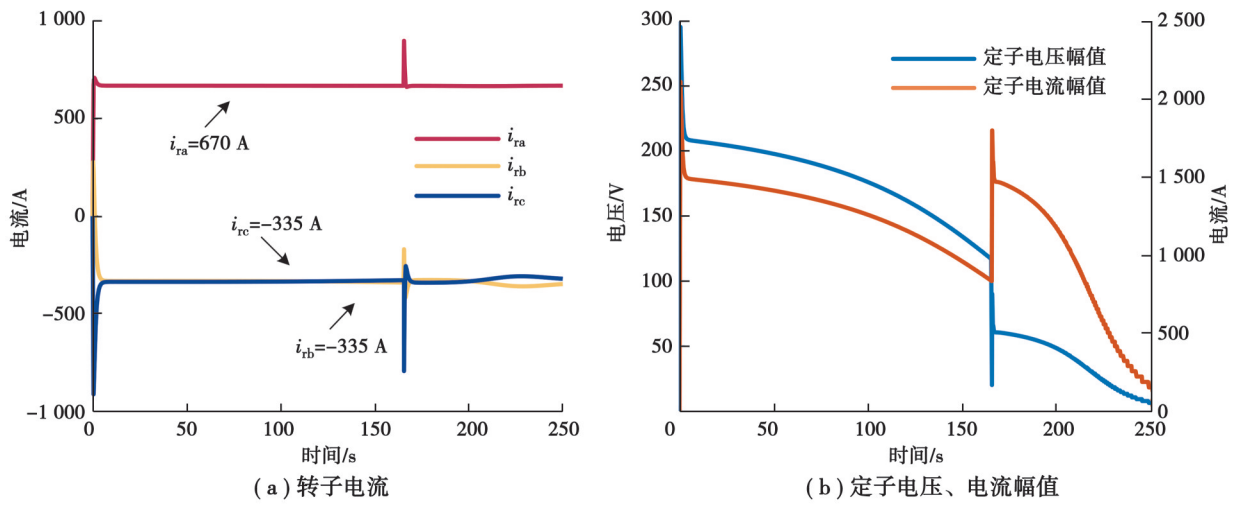


图 9 两级制动策略仿真结果

Fig. 9 Simulation results of two-stage braking strategy

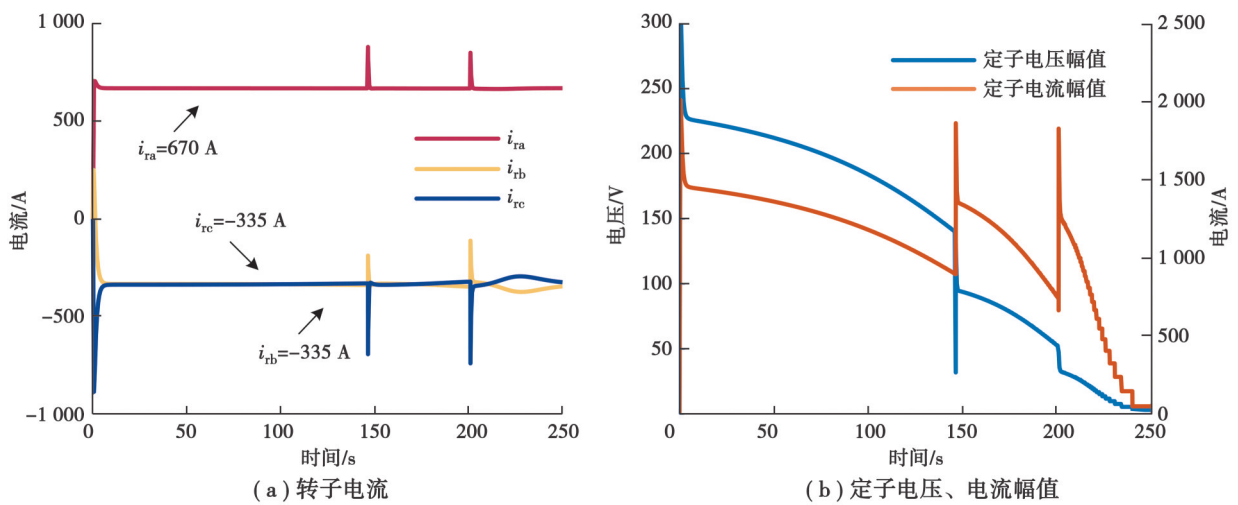


图 10 三级制动策略仿真结果

Fig. 10 Simulation results of three-stage braking strategy

由图可知,3种制动策略在制动过程中定子侧电压、电流,以及转子侧电流均小于电机定转子额定电压、电流,制动电阻所消耗功率小于制动功率限值 P_{limit} ,满足设计需求。

综上所述,制动过程仿真结果表明多级制动策略能实现快速降速,优化模型得出的参数配置方案符合要求,在制动过程中定子侧、转子侧的电压、电流,制动电阻消耗的功率均控制在约束范围内,保证了设备的安全性。

3.1.2 影响因素分析

在模型求解过程中,制动配置最优参数受到2.2节约束限制,其中电机额定参数是硬性限制,但制动电阻功率限制取值主要受制动速度、设备经济性与体积等因素影响。在2.3节的优化结果中,3种制动策略的电动势比例系数 k_e 均取得最大值,即转子电流已达到额定值,表明在该功率限制约束下,电机励磁能力被充分发挥,但其中三级制动策略最大功率达到功率限制 P_{limit} ,单级、两级制动策略最大功率均未达到,表明这2种策略已达到制动能力上限,而三级制动策略能力还未达到上限。因此改变功率限制 P_{limit} ,从300 kW提升到600 kW,每次间隔100 kW,利用模型重新求解,优化结果的目标函数值如表6所示。

表 6 多级制动策略在不同制动功率限制下的优化结果

制动策略	目标函数 T			
	$P_{limit}=300$ kW	$P_{limit}=400$ kW	$P_{limit}=500$ kW	$P_{limit}=600$ kW
单级	326.636	314.446	314.446	314.446
两级	294.556	259.323	244.469	244.469
三级	284.788	247.459	232.759	225.809

由表6可知, P_{limit} 每提升100 kW,单级制动策略制动时间缩短12、0、0 s,两级制动策略制动时间缩短37、15、11 s,三级制动策略制动时间缩短35、15、0 s,表明增大 P_{limit} ,3种制动策略均能有效提升制动效果,缩短降速时间,但提升速度随 P_{limit} 增大而减缓,同时级数较低的策略会更早达到制动能力上限。

对比同一 P_{limit} 下3种策略的制动效果,相较于单级制动, P_{limit} 为300 kW时两级、三级策略降速时间减少32、42 s,为400 kW时减少55、67 s,为500 kW时减少70、82 s,为600 kW时减少70、93 s,表明提升制动策略级数能有效减少制动时间,且随着 P_{limit} 的增大,制动效果提升越明显。

扩大 P_{limit} 的变化范围,从100 kW提升到600 kW,间隔设为50 kW,利用模型重新求解,可得功率限制 P_{limit} 与目标函数 T 的关系如图11所示。

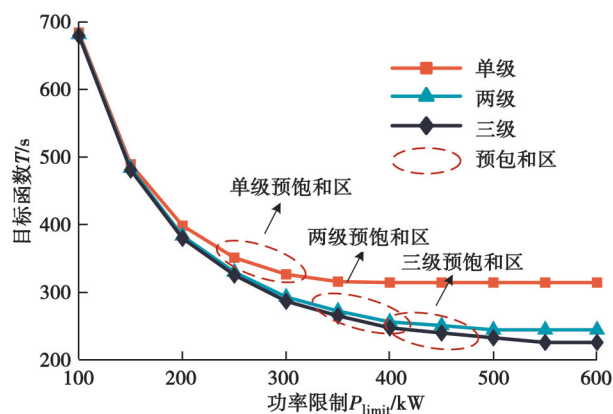


图 11 目标函数与功率限制关系图

Fig. 11 Relationship between objective function and power limits

由图11可知,3种策略制动能力随着功率限制 P_{limit} 增大提升速度会减缓,均存在预饱和区,策略的级数越高,预饱和区对应的 P_{limit} 越大同时目标函数 T 越小,在 P_{limit} 超过预饱和区后制动能力几乎不再提升,达到该策

略制动能力上限。同时随着制动策略级数增加,预饱和区移动距离会缩短,相邻预饱和区可能出现交叉,如图11中两级、三级制动在 P_{limit} 为400 kW时出现交叉,表明继续增加策略级数预饱和区重叠部分会增大,对制动能力提升有限。

综上所述,在通过优化模型配置ACEM制动参数时,如果只追求制动时间最优,增大制动功率限制,采用更多级制动策略,能有效提高制动效果;但如果对经济性有要求,需要限制电阻消耗功率峰值,选择在该功率限制下处于预饱和区的电阻级数,再采用模型优化参数更能兼顾制动性能与经济性。

3.2 实验验证

为进一步验证理论分析结果,文中搭建了7 kW交流励磁电机实验测试平台,实验电机参数如表7所示,其中转子侧参数已经折算到定子侧。平台上电机转速通过对拖电机维持,制动电阻采用两级电阻器,通过直流电源为转子提供励磁,采用示波器记录电机定、转子电压、电流,制动转矩通过联轴器上转矩仪测量,如图12所示。

表7 7 kW交流励磁电机额定参数
Table 7 Rated parameters of 7 kW ACEM

参数	数值	参数	数值
额定有功功率 P_N/kW	7	极对数 p	2
额定转速 $n_N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 500	转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.1
定子额定线电压 U_{sN}/V	380	定转子互感 L_m/H	0.111
定子电流 I_{sN}/A	11	定子漏感 $L_{\sigma s}/\text{H}$	0.002 19
额定频率 f/Hz	50	转子漏感 $L_{\sigma r}/\text{H}$	0.003 98
转子电流 I_{rN}/A	3	定子电阻 R_s/Ω	0.8
转差率 s	1/3	转子电阻 R_r/Ω	0.692 8



图12 7 kW交流励磁电机实验测试平台
Fig. 12 Experimental platform of 7 kW ACEM

首先,通过转矩仪测量该电机在不同转速点的空载机械摩擦转矩,然后,利用拖动电机将转子转速维持在多个不同转速点,定子投入相应电阻,再通过转矩仪测量转子受到的阻力转矩,记录实验结果中制动转矩与转速关系图,最后,将在Matlab/Simulink中搭建的制动仿真模型参数设置为实验平台7 kW电机,记录仿真结果中制动转矩与转速的关系曲线图,将其与实验结果作对比。

实验制动参数设计为转子直流励磁电流为3 A,定子在1 500~600 r/min时接阻值为30 Ω 的电阻,在600~100 r/min时接阻值为10 Ω 的电阻,在实验平台通过对拖电机将转速从1 500 r/min降至100 r/min,每隔100 r/min记录定子电压、电流,转子电流与转矩仪测量的制动转矩值,将在平台实验所得的制动转矩与转速关系图与仿真结果作对比,结果如图13所示。

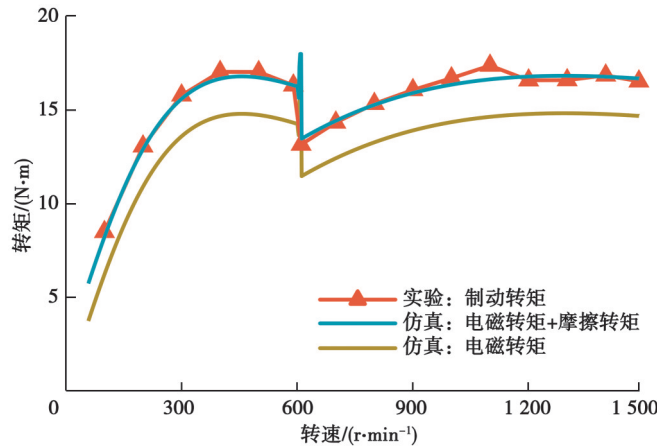


图 13 制动转矩与转速的仿真与实验结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation and experiment results of braking torque and speed

测试过程中转子转速为 1 500 r/min、定子接 30 Ω 电阻,转速为 600 r/min、定子接 10 Ω 电阻的定子 A 相电压峰-峰值 U_{sa_p-p} 、电流 I_{sa_p-p} ,转子 A 相电流 i_{ra} ,频率 f 的实验结果分别为图 14(a)、(b)所示。

结果表明,测量点转矩仪测量的转矩和仿真中电磁转矩与摩擦转矩之和基本相同,实验与仿真的制动转矩与转速曲线图基本吻合,表明在制动过程中在同种转速下产生的电磁制动转矩仿真与实测一致,验证了仿真模型的准确性。

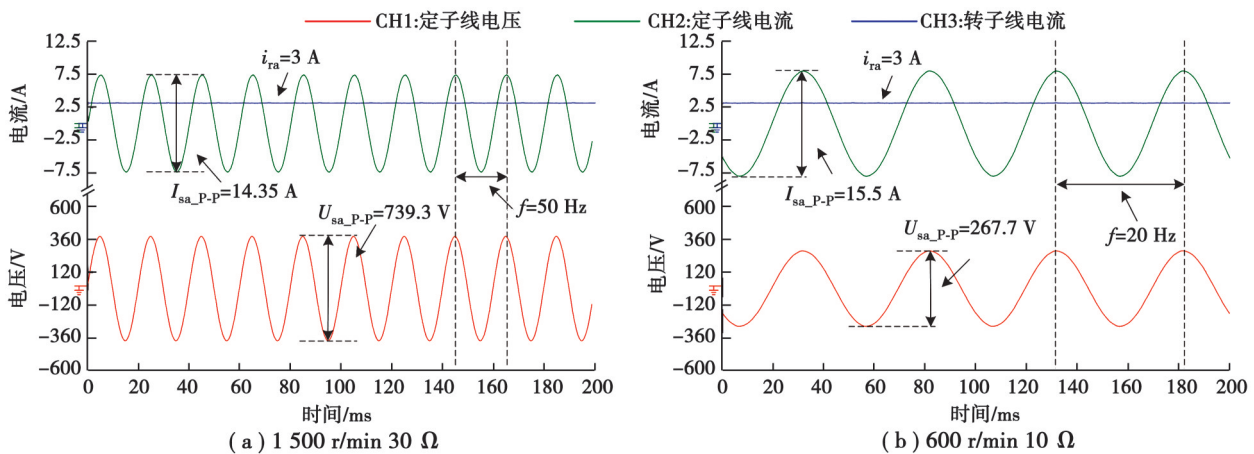


图 14 电机电压电流实验结果

Fig. 14 Experimental results of motor voltage and current

4 结 论

文中针对 ACEM 紧急制动工况下快速降速的需求,提出了一种柔性电制动控制策略,通过电磁阻力转矩对转子进行降速,为实现制动时间最优,采用遗传算法对制动参数配置方案进行优化,通过仿真与实物实验进行验证,并分析影响参数优化的限制因素,主要结论如下:

1) 所提制动策略与模型优化配置参数经仿真验证能实现快速有效制动,相比于单级电阻制动,两级制动效果提升 20.52%,三级制动效果提升 25.08%,且实验结果与理论计算误差在 5% 以内。

2) 采用多级制动策略能有效缩短制动时间,但随着级数增加制动性能提升减缓;增大功率限制能有效提升制动性能,但提升效果随功率限制增大而减缓,并出现饱和现象,存在制动能力上限,因此制动策略级数与功率限制选取在预饱和区范围内,能更好地兼顾制动性能与经济性。

3) 在 7 kW 交流励磁电机实验测试平台对仿真模型进行验证,证明了模型的准确性,研究结果能作为 ACEM 在工程领域运用时制动设备参数配置选型依据。

参考文献

- [1] 陈亚红, 邓长虹, 刘玉杰, 等. 抽水工况双馈可变速抽蓄机组机电暂态建模及有功-频率耦合特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 942-956.
Chen Y H, Deng C H, Liu Y J, et al. Electromechanical transient modelling and active power-frequency coupling characteristics of doubly-fed variable speed pumped storage under pumping mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 942-956. (in Chinese)
- [2] Yang D J, Yan G G, Zheng T Y, et al. Fast frequency response of a DFIG based on variable power point tracking control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4): 5127-5135.
- [3] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-168.
Xie X R, Ma N J, Liu W, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168. (in Chinese)
- [4] 陈龙翔, 乐振春, 刘永奇. 大型交流励磁变速抽水蓄能机组技术特征与研制框架[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2366-2375.
Chen L X, Le Z C, Liu Y Q. Technical characteristics and research framework of large AC excitation variable speed pumped storage units[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2366-2375. (in Chinese)
- [5] Zhao J L, Li H, Xiang X W, et al. Research on startup and emergency braking strategy of doubly-fed induction-machine-based flywheel energy storage system[C]//2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). November 5-8, 2023, Zhuhai, China. IEEE, 2023: 4971-4976.
- [6] 彭定杰. 双馈式风力发电机组机械制动系统的改进研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
Peng D J. Research on the improvement of the mechanical braking system of the double-fed induction generator[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [7] 孙建. 浅析两种 1.5MW 风力发电机组机械刹车系统[J]. 科技创新与应用, 2015, 5(34): 41-42.
Sun J. Analysis of two types of mechanical brake systems for 1.5MW wind turbines [J]. Technology Innovation and Application, 2015, 5(34): 41-42. (in Chinese)
- [8] 刘宏伟. 国产某机型风电机组实现高速刹车温度监测功能研究[J]. 能源科技, 2020, 18(4): 64-68.
Liu H W. Study on the realization of high-speed brake temperature monitoring function of a domestic wind turbine[J]. Energy Science and Technology, 2020, 18(4): 64-68. (in Chinese)
- [9] 索新良, 谭袖, 刘俊廷. 异步双馈风力发电机组刹车系统事故预防研究[J]. 电力安全技术, 2023, 25(10): 24-26.
Suo X L, Tan X, Liu J T. Research on the prevention of braking system events in asynchronous doubly-fed wind turbines[J]. Electric Safety Technology, 2023, 25(10): 24-26. (in Chinese)
- [10] 乔屹, 李铁鹰, 辛策. 风力发电机制动系统的改进设计与智能控制[J]. 机械工程与自动化, 2012, 41(1): 133-135.
Qiao Y, Li T Y, Xin C. Improvement design of wind generator brake system and intelligent control[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012, 41(1): 133-135. (in Chinese)
- [11] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36.
Xu D G, Wang W, Chen N. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36. (in Chinese)
- [12] Okedu K E, Muyeen S M, Takahashi R, et al. Wind farms fault ride through using DFIG with new protection scheme[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 242-254.
- [13] 张琛, 李征, 蔡旭, 等. 采用定子串联阻抗的双馈风电机组低电压主动穿越技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2943-2951.
Zhang C, Li Z, Cai X, et al. An active low voltage ride through strategy of DFIG-based wind turbine using stator series impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2943-2951. (in Chinese)
- [14] Huang J J, Zhang L, Sang S, et al. Optimized series dynamic braking resistor for LVRT of doubly-fed induction generator with uncertain fault scenarios[J]. IEEE Access, 2022, 10: 22533-22546.
- [15] Rahimi M, Parniani M. Coordinated control approaches for low-voltage ride-through enhancement in wind turbines with doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 873-883.

- [16] 龙志健. 封星技术在电梯永磁同步电动机中应用的优缺点[J]. 中国电梯, 2017, 28(1): 24-26.
Long Z J. Advantages and disadvantages of application for the high speed short circuit technology in elevator permanent magnet synchronous motor[J]. China Elevator, 2017, 28(1): 24-26. (in Chinese)
- [17] Choi G, Jahns T M. Investigation of key factors influencing the response of permanent magnet synchronous machines to three-phase symmetrical short-circuit faults[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4): 1488-1497.
- [18] Fomin E I, Dolotov K S, Ivanovsky S P. The modeling of PMSM during dynamic brake[C]//2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). September 29-October 1, 2023, Magnitogorsk, Russian Federation. IEEE, 2023: 299-303.
- [19] Jiang P, Li H, Xiang X W, et al. Analytical calculation and improvement method for short-circuit torque of permanent magnet synchronous motor[C]//2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). November 5-8, 2023, Zhuhai, China. IEEE, 2023: 1998-2003.
- [20] 冯云. 永磁同步型电梯驱动主机封星安全保护技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
Feng Y. Research on star sealing protection technology of permanent magnet synchronous elevator drive[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)
- [21] 李郑. 柔性电制动技术在各类型水轮发电机组停机中的应用[J]. 水电站机电技术, 2022, 45(4): 47-49, 78.
Li Z. Application of flexible electric braking technology in shutdown of various types of water turbine generator units[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2022, 45(4): 47-49, 78. (in Chinese)
- [22] 郑杰锐. 基于励磁系统的水轮机组制动技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
Zheng J R. Research on braking technology of hydrogenerator based on excitation system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [23] 丘恩华. 计及保护和安全控制的水轮发电机组电气制动方法及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Qiu E H. The method and application of electric braking of hydro-generator with consideration of protection and security control[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)