

变速抽水蓄能机组启动与制动策略研究

冯宇鹏¹, 陈旭东¹, 牛翔宇², 高洪¹, 来璐¹, 李建光², 黄陈雨龙¹

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;

2. 国网新源控股有限公司, 北京 100761)

摘要: 针对变速抽水蓄能机组的启动与制动问题, 研究了将电机定子短接, 利用交流励磁系统启动与制动机组的策略。建立了定子绕组短接, 电机按照定子磁场定向的数学模型, 推导了定子磁通观测器, 分析了电机启动和制动过程中转矩电流的电压极限、电流极限和转矩极限, 提出了机组的启动和制动策略。搭建了RTDS试验平台, 对1台300 MW变速抽蓄机组的启动和制动策略进行了试验研究, 结果表明该方案具有良好的启动和制动性能。

关键词: 变速抽水蓄能机组; 交流励磁; 机组启动与制动

中图分类号: TV743 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19141

Research on Starting and Stopping Strategy of Variable Speed Pumped Storage Unit

FENG Yupeng¹, CHEN Xudong¹, NIU Xiangyu², GAO Hong¹, LAI Lu¹, LI Jianguang², HUANG Chenyulong¹

(1. XJ Group Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China;

2. State Grid Xinyuan Co., Ltd., Beijing 100761, China)

Abstract: Aiming on the problem of starting and stopping of variable speed pumped storage unit, the strategy of short connection of motor stator, using AC excitation system to start and stop unit was studied. The mathematical model of motor with short-circuited stator using stator field-oriented vector control was established, the stator flux observer was deduced, the voltage limit, current limit and torque limit of torque current in the process of motor starting and stopping was analyzed, the starting and stopping strategy of the unit was designed. The RTDS test platform was built, and the starting and stopping strategies of a 300 MW variable speed pumped storage unit were tested. The results showed that the proposed scheme achieved perfect starting and stopping performance.

Key words: variable speed pumped storage unit; AC excitation system; starting and stopping of unit

抽水蓄能电站作为坚强智能电网的重要组成部分, 主要承担调峰填谷、调频调相、事故备用和黑启动等辅助服务功能^[1]。

与定速抽水蓄能机组相比, 变速抽水蓄能机组具有抽水工况功率可以调节、发电工况效率更高、功率调节速度快、可自启动和无需单独的启动装置静止变频器等优点^[2], 已在欧洲和日本得到大量应用。

我国对变速抽水蓄能机组的关键技术也开展了大量的研究, 文献[3]研究了基于自抗扰技术的变速机组交流励磁控制系统, 比传统PI控制器取得更好的动态性能; 文献[4-5]对变速抽蓄

机组的频率控制进行了研究。

抽蓄机组在发电工况, 可通过水轮机球阀和调速器进行启动, 但不能制动; 在抽水工况可通过调速器制动, 但不能启动, 因此需要交流励磁系统(AC excitation system, AES)在抽水工况变频启动机组, 在发电工况变频制动机组。

在机组的抽水工况启动方面, 文献[6]指出变速机组启动的基本原理是将定子短接, 通过交流励磁系统给转子施加幅值和频率逐渐增大的电压, 使转子在磁场作用下旋转并加速, 转速升高到接近同步转速的一个规定值, 但未进行具体的启动策略研究。文献[7]对基于状态观测器的

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(521104180013)

作者简介: 冯宇鹏(1987-), 男, 硕士, 中级工程师, Email: fengyp110@163.com

机组启动方案进行了研究,文献[8]对定子磁链定向的机组自启动矢量控制策略进行了研究,但均未考虑实际交流励磁系统输出电压为转差电压,不能将电机恒转矩加速至额定转速。在变速抽水蓄机组的制动方面,尚未有文献报道。

本文首先对机组定子短接,电机按照定子磁场定向矢量控制进行了建模分析,推导了定子磁通观测器,然后分析了电机在定子磁场定向矢量控制下的电压极限、电流极限和转矩极限,最后提出了机组的启动和制动策略,对转速环进行了详细的分析,并进行了RTDS试验验证。

1 机组建模分析

1.1 变速抽水蓄能系统

300 MW 变速抽水蓄能系统如图1所示,主要包括主变压器、定子断路器 K_2 、换相开关、定子短接开关 K_3 、发电电动机、水泵水轮机、机组控制保护系统、调速器、励磁断路器 K_1 和交流励磁系统。

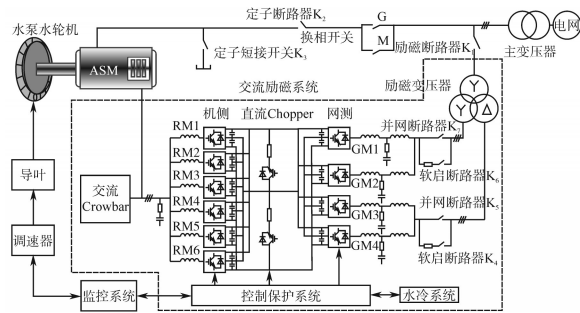


图1 300 MW 变速抽水蓄能系统

Fig.1 300 MW variable speed hydro pumped storage system

交流励磁系统主要包括励磁变压器、软启动断路器 K_4 和 K_6 、并网点断路器 K_5 和 K_7 、网侧、直流Chopper、机侧、交流Crowbar、控制保护系统和水冷系统。交流励磁系统网侧由4个NPC三电平功率模块并联组成,机侧由6个NPC三电平功率模块并联组成。

1.2 定子磁场定向矢量控制分析

定子短接,按照定子磁链定向时,电机电压和磁链在旋转坐标系下的方程为

电压方程:

$$\begin{cases} 0 = R_s i_{sd} + p \Psi_s \\ 0 = R_s i_{sq} + \omega_{sl} \Psi_s \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p \Psi_{rd} - \omega_0 \Psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p \Psi_{rq} + \omega_0 \Psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \Psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \Psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_s 为定子电阻; i_{sd} , i_{sq} 分别为定子电流的 d , q 轴分量; p 为微分算子; Ψ_s 为定子磁链; ω_{sl} 为转差角速度; ω_0 为交流励磁系统输出电压角速度; u_{rd} , u_{rq} 分别为转子 d , q 轴电压; R_r 为转子电阻; Ψ_{rd} , Ψ_{rq} 分别为转子磁链的 d , q 轴分量; i_{rd} , i_{rq} 分别为转子 d 轴和 q 轴电流; L_s 为定子电感; L_m 为定、转子之间的互感; L_r 为转子电感。

根据式(1)和式(2)可得定子磁链为

$$\Psi_s = \frac{L_m}{1 + \tau_s p} i_{rd} \quad (3)$$

其中

$$\tau_s = L_s / R_s$$

式中: τ_s 为定子时间常数。

根据磁链方程可得:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\Psi_s - L_m i_{rd}}{L_s} \\ i_{sq} = -\frac{L_m i_{rq}}{L_s} \end{cases} \quad (4)$$

电机的转矩方程为

$$T_e = 1.5 n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可得电机转矩为

$$T_e = -1.5 n_p \frac{L_m}{L_s} \Psi_s i_{rq} \quad (6)$$

式中: n_p 为电机的极对数; Ψ_s 为转子磁链; i_{rq} 为转矩电流。

因此,变速机组定子短接,按照定子磁场定向时,控制转子的 d 轴电流,就可以控制定子磁通的大小。当定子磁通保持恒定时,电机转矩和转子 q 轴电流成正比,通过控制转子 q 轴电流就实现了电机转矩的控制。

1.3 定子磁通观测器

交流励磁系统采用定子磁场定向矢量控制,定子磁通幅值和相位观测的准确性直接影响机组的转矩控制特性。

根据式(1)和式(4)可得转差角速度为

$$\omega_{sl} = \frac{L_m i_{rq}}{\tau_s \Psi_s} \quad (7)$$

由于机组定子短接,因此电机的旋转方向与磁场旋转的方向相反,磁场旋转角速度、转差角速度和电机旋转角速度满足

$$\omega_0 = \omega_{sl} - \omega_r \quad (8)$$

式中: ω_r 为电机旋转角速度。

定子磁链的相位为

$$\delta = \int \omega_0 dt \quad (9)$$

根据式(3)、式(7)~式(9)可得定子磁通观测器如图2所示。

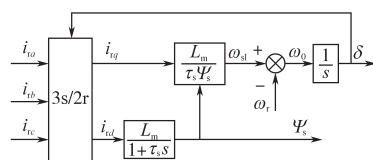


图2 定子磁链观测器

Fig.2 Stator flux estimator

2 定子磁场定向矢量控制的极限

2.1 电压极限

电机定子短接,交流励磁系统采用定子磁场定向矢量控制,其稳态电压满足

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_0 \Psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_0 \Psi_{rd} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(1),定子d轴电流在稳态为

$$i_{sd} = 0 \quad (11)$$

根据式(2)和式(11),转子磁链在稳态满足

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = L_r i_{rd} \\ \Psi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

式中: σ 为漏感系数。

因此,转子电压为

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_0 \sigma L_r i_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_0 L_r i_{rd} \end{cases} \quad (13)$$

交流励磁系统输出电压的最大值 $U_{\max}$ 由直流侧电压 U_{dc} 和脉宽调制策略决定,采用空间电压矢量脉宽调制策略时转子电压 u_{rd} 和 u_{rq} 需满足

$$u_{rd}^2 + u_{rq}^2 \leq U_{\max}^2 = \frac{U_{dc}^2}{3} \quad (14)$$

忽略转子电阻压降的影响,根据式(13)和式(14)可得转矩电流的电压极限为

$$i_{rq} \leq \frac{\sqrt{U_{\max}^2 - (\omega_0 L_r i_{rd})^2}}{\omega_0 \sigma L_r} \quad (15)$$

2.2 电流极限

AES输出的最大转矩电流在电流应力方面有两个限制,一为AES机侧变流器所能输出的最大电流 $I_{\max}$,二为AES网侧变流器能够传输的最大有功功率 P_{GSC_max} ,如下式所示:

$$\begin{cases} i_{rd}^2 + i_{rq}^2 \leq I_{\max}^2 \\ P_{RSC} \leq P_{GSC_max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_{RSC} 为AES机侧输出的有功功率。

因此,转矩电流的电流极限为

$$i_{rq} \leq \sqrt{I_{\max}^2 - i_{rd}^2} \quad (17)$$

$$i_{rq} \leq \frac{\sqrt{2} U_{rate_GSC} I_{rate_GSC}}{U_{rate_RSC}} \quad (18)$$

式中: U_{rate_GSC} 为AES网侧额定电压; I_{rate_GSC} 为AES网侧额定电流; U_{rate_RSC} 为AES机侧额定电压。

2.3 转矩极限

变速机组定子短接,定子侧参数折算到转子后的等效电路如图3所示。

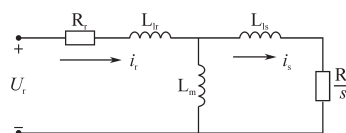


图3 变速电机定子短接等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of variable speed motor stator short connected

忽略铁损和励磁电流,定子电流为

$$i_s = \frac{U_r}{\sqrt{(R_r + \frac{R_s}{s})^2 + \omega_0^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}} \quad (19)$$

式中: s 为电机转差率; L_{ls} 为定子漏感; L_{lr} 为转子漏感。

电磁转矩为

$$T_c = \frac{3n_p U_r^2 R_s}{s \omega_0 [(R_r + \frac{R_s}{s})^2 + \omega_0^2 (L_{ls} + L_{lr})^2]} \quad (20)$$

根据式(20)可求得电机最大转差率为

$$s_{\max} = \frac{R_s}{\sqrt{R_r^2 + \omega_0^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}} \quad (21)$$

结合式(7)和式(20)可得转矩电流的转矩极限为

$$i_{rq} \leq \frac{L_s \omega_0}{L_m \sqrt{R_r^2 + \omega_0^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}} \Psi_s \quad (22)$$

3 机组启动与制动策略

交流励磁系统启动与制动变速机组的控制策略如图4所示,采用定子磁链定向矢量控制,控制内环为转矩电流环和励磁电流环,控制外环为定子磁通环和转速环。对转速进行闭环控制,得到转矩电流指令 i_{rq}^* ,对定子磁通进行闭环控制,得到励磁电流指令 i_{rd}^* 。

转矩电流指令按照电压极限、电流极限和转矩极限进行限幅处理,限幅值取三者的最小值;励磁电流指令按照机侧的最大电流进行限幅。

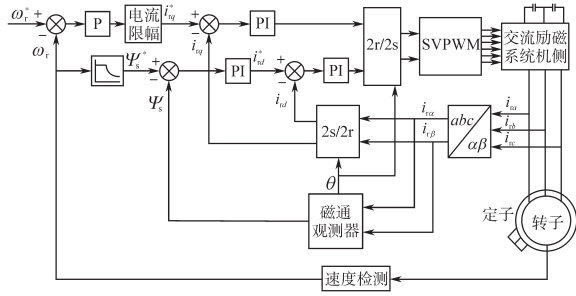


图4 交流励磁系统启动与制动机组的控制策略

Fig.4 Control strategy of AES starting and stopping unit

由于电机转动惯量大,为了防止电机转速在目标值附近波动,转速环采用P调节器。

3.1 启动策略

变速机组在抽水工况通过定子短接,利用交流励磁进行启动,启动过程包括以下几个阶段:

1)准备阶段

AES确认定子断路器 \$K_2\$ 处于断开状态,向监控系统请求闭合定子短接开关 \$K_3\$,闭合励磁断路器 \$K_1\$。

启动交流励磁系统网侧,闭合网侧软启断路器 \$K_4\$ 和 \$K_6\$,电网通过软启电阻和网侧的反并联二极管给直流侧充电,当直流电压大于0.6标幺值且持续3s后,闭合网侧并网断路器 \$K_5\$ 和 \$K_7\$,断开网侧软启断路器 \$K_4\$ 和 \$K_6\$,当直流电压大于0.8标幺值且持续2s后,开启网侧控制脉冲,将直流电压控制为设定值。

2)励磁阶段

AES对电机进行励磁,在这个阶段,转速环不投入,转矩电流指令 \$i_{tq}^*\$ 为零,定子磁通环投入,定子磁通指令按照设定的斜率上升至额定磁通,定子磁通环通过PI调节器得到励磁电流指令 \$i_{fd}^*\$。

3)恒转矩升速阶段

电机定子磁通达到额定磁通后,AES投入转速环,转速指令按照设定的斜率上升至设定转速,转速环通过P调节器得到转矩电流指令 \$i_{tq}^*\$,当转速环输出的转矩电流指令大于电流极限时,转矩电流指令按照电流极限输出。

由于转速指令按照斜坡上升,转速环输出的转矩电流恒定,在这个阶段电机定子磁通恒定为额定磁通,励磁电流和转矩电流极限均为恒定值,因此电机转矩恒定不变,机组为恒转矩升速。

4)恒功率升速阶段

交流励磁系统能够输出的最大电压与其调速范围成正比,具体为

$$U_{\max} = s_{\max} U_{\text{rate_rotor}} \quad (23)$$

其中

$$s_{\max} = \omega_{\text{sl_max}} / \omega_{0_rate}$$

式中: \$s_{\max}\$ 为机组运行的最大转差率; \$\omega_{0_rate}\$ 为同步角速度; \$\omega_{\text{sl_max}}\$ 为最大转差角速度; \$U_{\text{rate_rotor}}\$ 为转子额定电压。

由于AES的额定电压按照机组并网后的转速运行范围设计,当电机旋转角速度大于最大转差角速度时,AES的输出电压不能进一步增大,因此需要进行弱磁控制以保证AES的调制度不饱和,磁通指令一般按照与电机旋转角速度成反比的方法给定,如下式所示:

$$\Psi_s^* = \frac{\omega_{\text{sl_max}}}{\omega_r} \Psi_{s_rate} \quad (24)$$

式中: \$\Psi_s^*\$ 为定子磁通指令; \$\Psi_{s_rate}\$ 为定子额定磁通; \$\omega_r\$ 为电机转子角速度。

在这个阶段,AES输出电压为最大电压,转矩电流由转速环闭环输出,大小保持不变,机组恒功率升速。

5)降功率升速阶段

随着转速的上升,定子磁通和转矩电流极限不断减小,当转矩电流指令大于转矩极限时,AES按照转矩极限输出转矩电流,以保证机组的稳定运行。

在这个阶段,AES输出的电压仍为最大电压,但转矩电流小于电流极限,并随着转速的升高而不断降低,由于AES输出的电流不断减小,机组降功率升速。

3.2 制动策略

变速机组在发电工况通过定子短接,利用交流励磁系统进行制动,机组制动过程包括以下几个阶段。

1)准备阶段

交流励磁系统收到监控系统下发的停机指令后,断开定子断路器 \$K_2\$,然后降低励磁电流至零后封锁机侧脉冲,此时机组处于空转状态。

AES确认定子断路器 \$K_2\$ 处于断开状态,向监控系统请求闭合定子短接开关 \$K_3\$。

2)励磁阶段

AES对电机进行励磁,在这个阶段,转速环不投入,转矩电流指令 \$i_{tq}^*\$ 为零,定子磁通环投入,定子磁通指令按照式(24)给定,并根据设定的斜率上升。

3)制动阶段

电机定子磁通达到设定磁通后,AES投入转

速环,转速指令按照设定的斜率下降至设定转速,转速环通过P调节器得到转矩电流指令 i_{rq}^* ,转矩电流指令根据电压极限、电流极限和转矩极限进行限幅处理。

当转速接近设定转速时,由于转速环为P调节器,因此输出的转矩电流指令开始降低,机组平稳达到设定转速。

4)机械制动阶段

交流励磁系统将机组制动至设定转速后,封锁机侧脉冲,并上传监控系统“机组制动完成”,监控系统投入机械制动器,将机组转速制动为零。

3.3 转速控制分析

转速环采用P调节器主要有两方面的原因,一方面300 MW变速抽水蓄能机组惯性较大,采用P调节器可避免机组转速在接近设定转速后出现超调和低频波动,机组转速可以快速平稳达到设定转速;另一方面,机组在抽水启动工况,当转速在调速范围内,机组就可同期并网;在发电制动工况,由于负载转矩小,实际转速与设定值误差很小。

在稳态,机组的转矩电流为

$$i_{rq}^* = -(\omega_r^* - \omega_r)k_p \quad (25)$$

式中: k_p 为转速环比例系数。

设负载转矩为

$$T_L = k_L \omega_r T_{rate} \quad (26)$$

式中: T_L 为负载转矩; k_L 为负载转矩系数; T_{rate} 为机组的额定转矩。

电机的定子磁通为

$$\Psi_s = \begin{cases} \frac{\omega_{sl\max}}{\omega_r} \Psi_{s_rate} & \omega_r \geq \omega_{sl\max} \\ \Psi_{s_rate} & \omega_r < \omega_{sl\max} \end{cases} \quad (27)$$

在稳态,电磁转矩与负载转矩相等

$$T_e = T_L \quad (28)$$

在抽水启动工况,机组的稳态转速大于最大转差角速度,根据式(6)、式(25)~式(28)可得机组启动的稳态转速为

$$\omega_r = \frac{-k_p \omega_{sl\max} + \sqrt{(k_p \omega_{sl\max})^2 + 4k_p k_L \omega_{sl\max} i_{rqrate} \omega_r^*}}{2k_L i_{rqrate}} \quad (29)$$

式中: i_{rqrate} 为电机的额定转矩电流标么值。

在发电制动工况,电机的稳态转速小于最大转差角速度,定子磁通在稳态为额定磁通,根据式(6)、式(25)~式(28)可得机组制动的稳态转速为

$$\omega_r = \frac{k_p}{k_p + k_L i_{rqrate}} \omega_r^* \quad (30)$$

4 RTDS试验结果

为了验证本文所提交流励磁系统启动和制动变速机组策略的正确性,搭建了1台15.75 kV/300 MW变速抽水蓄能机组的RTDS试验系统,如图5所示。

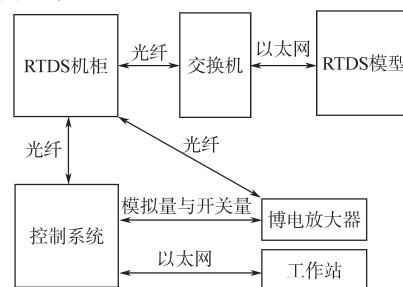


图5 变速抽水蓄能机组的RTDS试验系统

Fig.5 RTDS test system for variable speed pumped storage unit

系统由RTDS机柜、交换机、RTDS模型、AES控制保护系统、博电放大器和工作站组成。RTDS模型中搭建了变速抽水蓄能机组和AES的主回路,控制保护系统将生成的调制波发送至RTDS。变速电机参数为:额定功率334 MV·A,额定有功功率300 MW,额定电压15.75 kV,额定转速428.6 r/min,并网运行最大转差率0.1,转动惯量2 000 kg·m²,额定转速负载转矩0.01标么值。交流励磁系统参数为:网侧额定功率28 MV·A,机侧额定功率42 MV·A,额定交流电压3 300 V,额定直流电压5 700 V,开关频率900 Hz,转速环控制参数5。

图6和图7为机组启动的试验波形,机组经180 s平滑升速到设定转速。

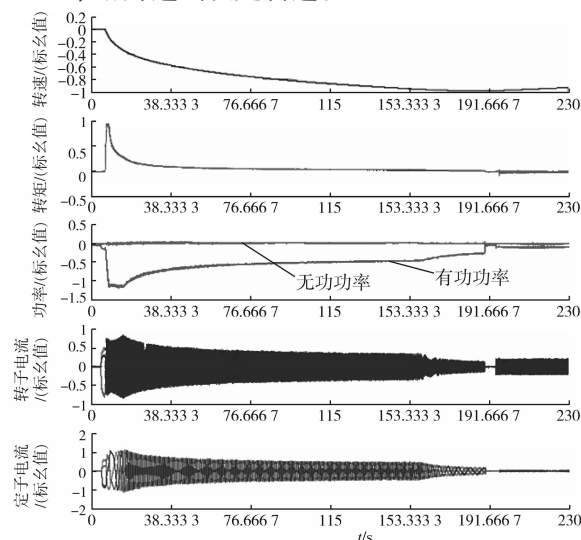


图6 机组抽水工况启动整体试验波形

Fig.6 The whole test waveforms of unit start in the pump mode

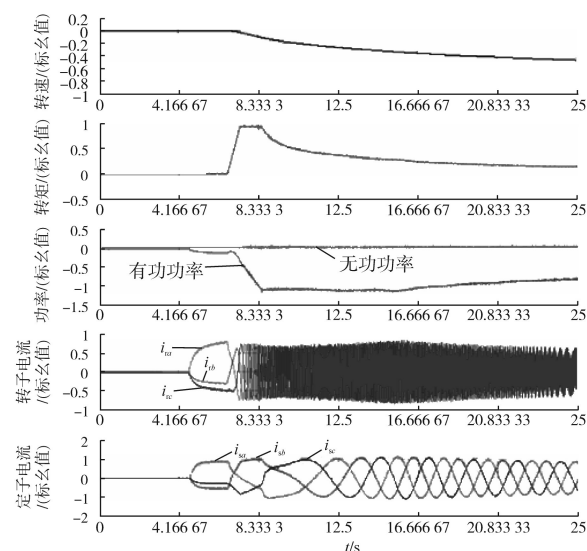


图7 机组抽水工况启动初始阶段试验波形

Fig.7 The initial test waveforms of unit start in the pump mode

AES首先对电机进行励磁,然后逐渐增加转矩电流,达到额定转矩电流后,电机恒转矩运行。

随着转速的增加AES的有功功率不断增加,当转速达到0.1标幺值时,AES输出电压和有功功率均达到最大值。转速大于0.1标幺值后,机组开始弱磁升速,磁通和转矩都开始减小,但AES输出的电压和电流保持不变,因此有功功率保持不变,随着转速的进一步上升,AES输出的有功功率开始减小。

在抽水启动过程中,转子磁场为正序旋转,电机转子为负序旋转,转子电流和定子电流均为正序,转子电流频率为同步频率,定子电流频率为转差频率。

机组设定转速为428.6 r/min,根据式(28)计算可得机组稳态转速为422.53 r/min,RTDS试验结果的机组稳态转速为422.6 r/min,与计算结果一致,转速控制误差为1.4%。

虽然机组的稳态转速与设定转速存在一定的偏差,但由于机组的转速运行范围为385.7~471.4 r/min,因此该转速能够满足机组的励磁同步并网的要求。

图8和图9为机组制动的试验波形,由于负载转矩和电磁转矩同方向,机组经138 s达到设定转速。

AES首先断开定子断路器,逐渐降低励磁电流后封锁机侧脉冲。定子短接开关闭合后,AES机侧重新开启脉冲励磁,然后工作在降功率制动阶段,随着转速的减小,转矩电流和磁通不断增

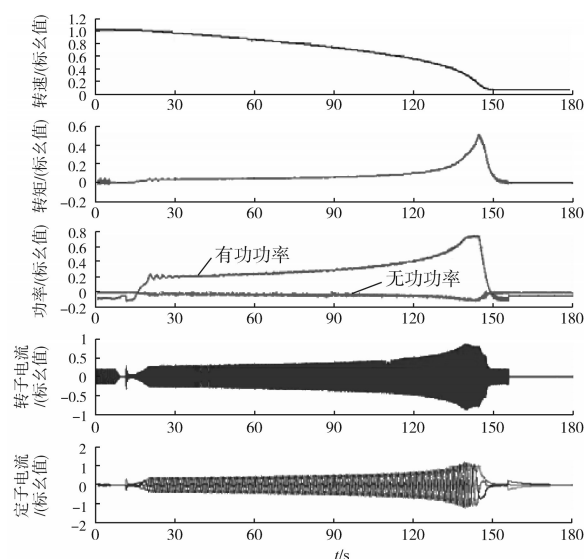


图8 机组发电工况制动试验波形

Fig.8 The test waveforms of unit stop in the generator mode

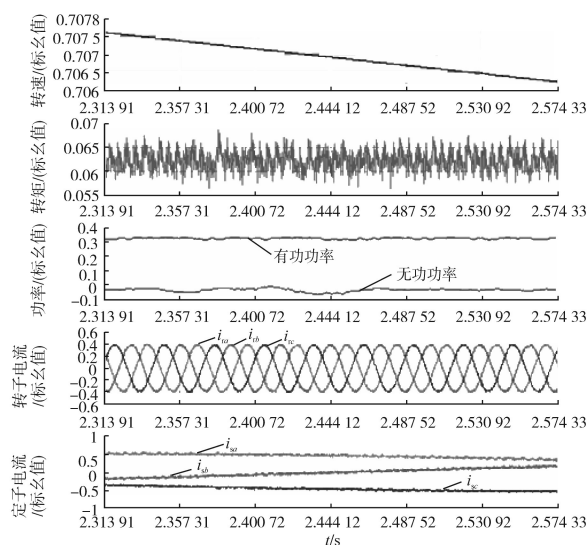


图9 机组发电工况制动试验细节波形

Fig.8 The detail test waveforms of unit stop in the generator mode

大,电磁转矩和有功功率不断增大。接近目标转速时,转速调节器输出的转矩电流降低,电磁转矩和有功功率变小,在整个制动过程中,机组均处于降功率制动阶段。

在发电制动过程中,转子磁场为负序旋转,电机转子为正序旋转,转子电流为负序,定子电流为正序,转子电流频率为同步频率,定子电流频率为转差频率。

机组设定转速为21.43 r/min,根据式(30)计算可得机组稳态转速为21.4 r/min,RTDS试验结果的机组稳态转速为21.4 r/min,与计算结果一致,由于机组低速运行时,负载转矩小,因此实际转速与设定转速偏差很小,且略低于设定转速。

5 结论

本文对变速抽水蓄能机组通过定子短接,交流励磁变频启动和制动的方案进行了理论研究,对1台300 MW变速抽水蓄能机组的启动和制动方案进行了RTDS试验验证,研究结论如下:

1)机组的启动和制动过程,转矩电流受到电压极限、电流极限和转矩极限的限制。由于电压极限的限制,当电机转速大于交流励磁系统的调速范围后,需要进行弱磁升速。由于转矩极限的限制,当转矩电流大于转矩极限时,需要进行降功率升速。

2)机组的启动过程主要包括励磁阶段、恒转矩升速、恒功率升速和降功率升速4个阶段。机组的制动过程主要包括励磁阶段和降功率制动两个阶段。

3)机组在抽水启动过程中,转子磁场为正序旋转,电机转子为负序旋转,转子电流频率为同步频率,定子电流频率为转差频率。在发电制动过程中,转子磁场为负序旋转,电机转子为正序旋转,转子电流频率为同步频率,定子电流频率为转差频率。

4)转速环采用P调节器,机组可平稳达到设

定转速,虽然机组启动和制动的稳态转速略低于设定转速,但转速误差均很小,对机组后续的励磁并网和机械制动没有影响。

参考文献

- [1] 林铭山. 抽水蓄能发展与技术应用综述[J]. 水电与抽水蓄能, 2018,4(1):1-4.
- [2] 蔡卫江,徐宋成,何林波. 浅谈可变速抽水蓄能机组的控制策略[J]. 水电厂自动化,2017,38(1):52-55.
- [3] 纪历,邵宜祥,高苏杰,等. 可变速抽水蓄能机组交流励磁系统自抗扰控制[J]. 电力系统自动化,2017,41(13):162-167.
- [4] 李辉,刘海涛,宋二兵,等. 双馈抽水蓄能机组参与电网调频的改进虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(10):58-65.
- [5] 邹金,赖旭,汪宁渤. 大规模风电并网下的抽水蓄能机组调频控制研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):564-571.
- [6] 吴毅,简优宗,杨合民. 大型抽水蓄能交流励磁机组发展的必要性及功能介绍[J]. 电气技术,2015(3):118-121.
- [7] 邵宜祥,纪历,袁越,等. 可变速抽水蓄能机组在抽水工况下的自启动方案[J]. 电力系统自动化,2017,40(24):125-130.
- [8] 闫伟,张亚武,施一峰,等. 抽水蓄能电站可变速机组启动技术研究[J]. 水力发电,2018,44(4):81-85.

收稿日期:2018-05-31

修改稿日期:2018-09-10