

抽水蓄能电站无级调速机组控制策略

朱菲菲, 闫春乐, 简优宗

(国电南瑞科技股份有限公司 江苏 南京 211106)

摘 要: 抽水蓄能电站具有调峰、填谷、事故备用等功能,具有启动灵活、反应快速等特点,是电力系统中的重要组成部分. 相比传统抽水蓄能机组,无级调速机组可提高机组各工况下的运行效率,实现自启动和电制动,参与电网自动频率调节等在国外大量被采用,而国内的抽水蓄能电站目前尚没有无级调速机组. 针对这一现状,根据抽水蓄能电站和无级调速机组的特点研究其数学模型和各种工况的控制策略,并依照国外某项目的参数进行仿真,通过仿真验证了所提出控制策略的正确性,为进一步的工程应用提供了理论依据.

关键词: 抽水蓄能; 无级调速; 交流励磁; 控制策略

DOI: 10. 15938/j. jhust. 2016. 01. 014

中图分类号: TM612 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2016)01-0066-06

Control Strategy of AC Excitation for Pumped Storage Power Station

ZHU Fei-fei, YAN Chun-le, JIAN You-zong

(NARI Technology Development Co., Ltd. Nanjing 210060, China)

Abstract: With the functions of peak shaving, valley filling and emergency using, PSPS (pumped-storage power station) is an important part of power system, which has advantages such as flexible startup and quick response. Compared with traditional pumped storage unit, stepless speed regulation unit can improve running efficiency in different conditions, realize self-starting and electric braking, and is compatible with automatic frequency regulation of the power system. For these reasons, stepless speed regulation unit is widely adopted abroad. However, there is still no utility record in China. Considering this situation and based on the features of PSPS and stepless speed regulation unit, this article studied the mathematics model and control strategy in different conditions, and made simulation experiment according to parameters of a project abroad. The result of the simulation proved the correctness of the control strategy, which provides a theoretical foundation for further engineering application.

Keywords: PSP; Adjustable speed stepless; AC excitation; control strategy

1 抽水蓄能电站国外内发展现状

抽水蓄能电站具有调峰、填谷、事故备用等功能,是电力系统中的重要组成部分^[1-4].

目前国内抽水蓄能电站机组全部是定速机组,在国外尤其是日本、德国等国家从 20 世纪 90 年代开始大量的建设交流励磁机组抽水蓄能电站^[5-8]. 日本已经投运的可变速机组容量达到 2 746. 5 MVA, 占全世界可变速机组容量的 76. 26%^[5-8]. 德国已

收稿日期: 2014-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(5156114501).

作者简介: 朱菲菲(1987—),女,硕士,工程师;

闫春乐(1987—),女,助理工程师.

通讯作者: 简优宗(1986—),男,硕士,工程师,E-mail: jianyouzong@163.com.

经投运的可变速机组容量为 660MVA 占全世界可变速机组装机容量的 18.33%^[5-6]。另外欧洲一些国家也投运有可变速抽水蓄能电站,如斯洛文尼亚于 2009 年在 AVCE 电站投运了一台 195MVA 的可变速抽水蓄能机组。到 2020 年,要投运的可变速机组日本和欧洲还是占主要部分,其中日本为 1 985MVA,德国为 1 680MVA^[5-6]。

由于恒速机组在水泵运行状态下输入电功率一定,不能参与电网频率的自动控制。但如果采用变速机组,由于水泵输入功率与转速 3 次方成正比,转速有少量变化,输入功率就会大幅度改变,使抽水蓄能机组具有自动跟踪电网频率变化调整水泵水轮机输入功率的能力,为电力系统提供相应的频率自动控制容量。变速机组通过改变转速能更好地适应发电和抽水两种运行工况,使水轮机和水泵的运行效率都有所提高,同时也可适应更宽地扬程变幅和频率变化范围。根据不同的运行水头选择不同的转速可以明显地改善水泵水轮机的水力性能,减少振动、空蚀和泥沙磨损,扩大运行范围,提高机组的运行稳定性^[5-7]。在有功调节方面,变速机组通过调整转子交流励磁电流的相位及频率,可实现有功功率的快速调节,其调节时间仅在几十毫秒级。在启动过程中,恒速机组需要定子绕组通过其他启动装置提供频率逐渐增大的电流来实现平滑启动,但是变速机组可以通过定子短接的方式直接通过交流励磁装置调节输出的电压幅值和频率来实现机组的平滑启动。综合以上所述的种种优点,使得在国内发展可变速抽水蓄能机组的发展前景很光明。

2 抽水蓄能电站交流励磁机组的数学模型及控制策略

交流励磁机组接线示意图如图 1 所示,定子通过开关直接接入电网,转子通过变流器功率变换后经变压器接入电网。变流器采用电压型交直交变流器。机组应当满足的功能有:在发电或水泵工况下的变转速运行,水泵工况下的 AFC(auto frequency control) 功能,水泵模式下规定时间内的平滑自启动,水泵模式下按指令进行功率调节,电制动等。

2.1 交流励磁机组的数学模型

定子采用发电机惯例,转子采用电动机惯例,交流励磁电机在二相旋转坐标系下的数学模型为^[8-12]:

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_1 \Psi_{sq} - R_s i_{sd} \\ u_{sq} &= \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_1 \Psi_{sd} - R_s i_{sq} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{rd} &= \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - \omega_2 \Psi_{rq} + R_r i_{rd} \\ u_{rq} &= \frac{d\Psi_{rq}}{dt} + \omega_2 \Psi_{rd} + R_r i_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} l \Psi_{sd} &= -L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Psi_{sq} &= -L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} l \Psi_{rd} &= L_r i_{rd} - L_m i_{sd} \\ \Psi_{rq} &= L_r i_{rq} - L_m i_{sq} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$T_{em} = 1.5PL_m(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) \quad (5)$$

其中: u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 、 Ψ_{sd} 、 Ψ_{sq} 分别是指定子电压、电流和磁链的 d、q 轴分量; u_{rd} 、 u_{rq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 、 Ψ_{rd} 、 Ψ_{rq} 分别是指转子电压、电流、磁链的 d、q 轴分量; R_s 、 L_s 分别指定子的电阻和电感; R_r 、 L_r 分别为转子的电阻和电感; L_m 为互感; ω_1 、 ω_2 分别为同步角速度和转差角速度; T_{em} 为电磁转矩; P 为极对数。

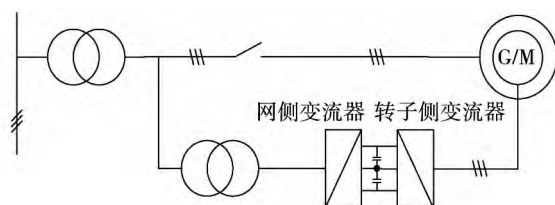


图 1 抽水蓄能电站交流励磁机组接线示意图

T 型等效图如图 2 所示^[13-17]。

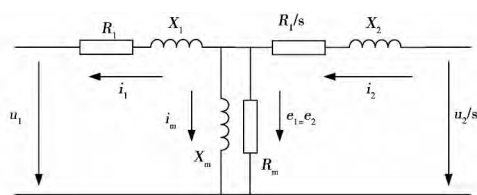


图 2 双馈电机 T 型等效图

简化后电流、电压、功率实际值计算公式为

$$I_{2d} = I_{1d} \frac{n_s}{n_r}, I_{2q} = I_m + I_{1q} \frac{n_s}{n_r} \quad (6)$$

$$U_{2d} = U_{1d} \frac{n_s}{n_r} s, U_{2q} = U_{1q} \frac{n_s}{n_r} s \quad (7)$$

$$P_r = sP_s, Q_r = Q_m + sQ_s \quad (8)$$

其中 $\frac{n_s}{n_r}$ 为定子和转子的匝比。

2.2 网侧变流器的数学模型和控制策略

无论抽水、发电、自启动、电制动、调相工况,网

侧变流器在交直交变频拓扑中的作用都是维持直流电压稳定,因此网侧采用直流电压外环,电流内环的控制策略。

网侧变流器数学模型为

$$\begin{cases} v_d = -(R + Lp) i_d + \omega L i_q + e_d \\ v_q = -(R + Lp) i_q - \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (9)$$

其中: R 、 L 为网侧变流器交流侧等效阻抗和电感; i_d 、 i_q 为网侧电流的 d 、 q 轴分量(分别对应于无功、有功分量); ω 为电网电压的电角速度; e_d 、 e_q 为网侧电压的 d 、 q 轴分量。

当电流环采用 PI 调节器时,电流环控制方程为

$$\begin{cases} v_d = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}) (i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \\ v_q = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}) (i_q^* - i_q) - \omega L i_d + e_q U_{2/3} \end{cases} \quad (10)$$

直流电压的变化取决于有功电流的大小,因为电压环控制方程为

$$i_{qref} = (K_{up} + \frac{K_{ul}}{s}) (u_{dref} - u_{dc}) \quad (11)$$

无功电流给定值 i_{dref} 取决于系统对网侧无功的要求,当单位功率因数运行时, $i_{dref} = 0$ 。

控制框图如图 3 所示^[8-10],其中 e_a 、 e_b 、 e_c 表示电网电压。

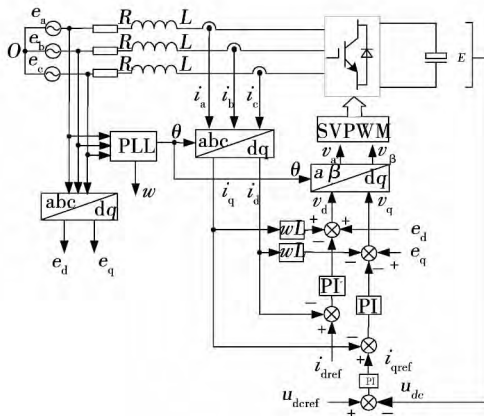


图3 网侧变流器控制框图

2.3 转子侧变流器控制策略

2.3.1 发电、抽水、调相工况的控制策略

发电工况运行是通过水轮机带动电机旋转,当转速接近同步转速时开始同期控制,当定子电压的幅值、频率、相位都满足条件后定子接触器合闸,然后控制电机发出功率送入电网的过程。抽水工况运行是通过启动装置(背靠背、SFC、自启动等)启动电

机,当接近同步转速时开始同期控制,当定子电压的幅值、频率、相位都满足条件后定子接触器合闸,然后控制电机吸收功率带动水泵抽水的过程。两种工况下从同期到稳定运行只是电流(功率)流向不同,原理和控制策略一致。即在同期并网的过程中,采取定子电压外环,转子电流内环的控制策略。当并网以后,抽水工况下的定子电压与电网一致,切换为功率外环电流内环的控制方式。发电方式仍然保持电压外环电流内环,目的是为了维持电网电压在额定值。在抽水或者发电过程中的调相运行是在抽水或者发电时同时吸收或发出无功功率,在控制上仅仅是改变了有功和无功给定值。

将式(4)代入式(2),并忽略定子电流的动态过程,得到转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_2 L_r i_{rq} + \omega_2 L_m i_{sq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_2 L_r i_{rd} - \omega_2 L_m i_{sd} \end{cases} \quad (12)$$

转子侧变流器采取 PI 调节器,则转子侧电流环控制方程为:

$$\begin{cases} u_{rd} = (K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}) (i_{rdref} - i_{rd}) - \omega_2 L_r i_{rq} + \omega_2 L_m i_{sq} \\ u_{rq} = (K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}) (i_{rqref} - i_{rq}) + \omega_2 L_r i_{rd} - \omega_2 L_m i_{sd} \end{cases} \quad (13)$$

在同期并网的过程中,定子电流为 0,式(3)代入式(1),得到

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{di_{rq}}{\omega_1 dt} + \frac{u_{sq}}{\omega_1 L_m} \\ i_{rq} = \frac{di_{rd}}{\omega_1 dt} - \frac{u_{sd}}{\omega_1 L_m} \end{cases} \quad (14)$$

电压环采用 PI 控制,选择电压环控制方程为:

$$\begin{cases} i_{rdref} = (K_{up} + \frac{K_{ul}}{s}) (u_{sqref} - u_{sq}) \\ i_{rqref} = -(K_{up} + \frac{K_{ul}}{s}) (u_{sdref} - u_{sd}) \end{cases} \quad (15)$$

用 P_a 、 P_r 分别表示定子侧有功功率和无功功率。

$$\begin{cases} P_a = 3(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) / 2 \\ P_r = 3(u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) / 2 \end{cases} \quad (16)$$

将式(3)代入,忽略定子电阻上压降,可以得到功率与转子电流关系为

$$\left. \begin{aligned} i_{rd} &= \frac{L_s 2P_a}{L_m 3U_s} \\ i_{rq} &= -\frac{L_s 2P_r}{L_m 3U_s} - \frac{U_s}{\omega_1 L_m} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

功率控制方程为

$$\left. \begin{aligned} i_{rdref} &= \left(K_{pp} + \frac{K_{pl}}{s} \right) (P_{aref} - P_a) \\ i_{rqref} &= -\left(K_{pp} + \frac{K_{pl}}{s} \right) (P_{rref} - P_r) - \frac{U_s}{\omega_1 L_m} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

整个控制框图如图 4 所示。

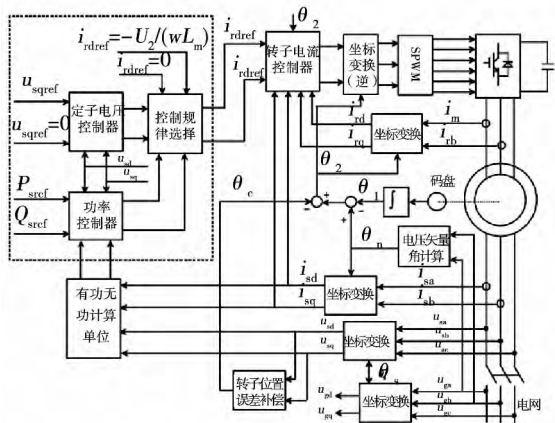


图 4 抽水或发电工况下转子侧变流器控制框图

2.3.2 自启动、电制动工况的控制策略

自启动或电制动工况都是把定子短接,在转子上施加幅值和频率都变化的电压,与感应电机的原理类似(感应电机是转子短接,定子施加电压)。此时按照 VVVF 的控制方式。

感应电机的定子反电势方程为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m \quad (19)$$

其中: E_1 、 f_1 、 Φ_m 分别为定子反电势、定子频率、每极气隙磁通量; $N_1 k_{w1}$ 为定子相绕组等效匝数,电机一定时为定值。为了保证电机铁芯不饱和并且充分利用,在调节定子电压时要同时调节供电频率,确保反电势幅值和频率之比为常量,即 $\frac{E_1}{f_1} = \text{constant}$ 。

机端电压方程(电动机参考方向)为

$$U = E_1 + I_1 R_1 \quad (20)$$

在转速较高时,机端电压和电动势较大,定子电阻上压降 $I_1 R_1$ 可以忽略。但是在转速较低时,机端电压和电动势都比较小, $I_1 R_1$ 就不能忽略,必须把电机定子机端电压适当的提升,以补偿定子电阻上的压降^[20-21]。

相比定速机组的混合制动方式,可以通过能量

回馈的方式加速停机、减小功率损耗,提高效率。

3 仿真研究

按照上述控制策略进行仿真,电机参数为定子侧最大视在功率 288 900 kVA,额定定子电压 18 kV,额定定子频率 50 Hz,转子侧开口电压 30.8 kV,同步转速 500 r/min,变速范围 450 ~ 530 r/min,电机转动惯量 $775 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,水泵水轮机转动惯量有水时 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,无水时 $32 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,定子阻抗 1.75Ω ,定子漏抗 105.4Ω ,转子折算阻抗 1.68Ω ,转子折算漏抗 162.7Ω ,激磁阻抗 $2612 \sim 2645 \Omega$ 。发电并网过程的仿真波形如图 5 所示。

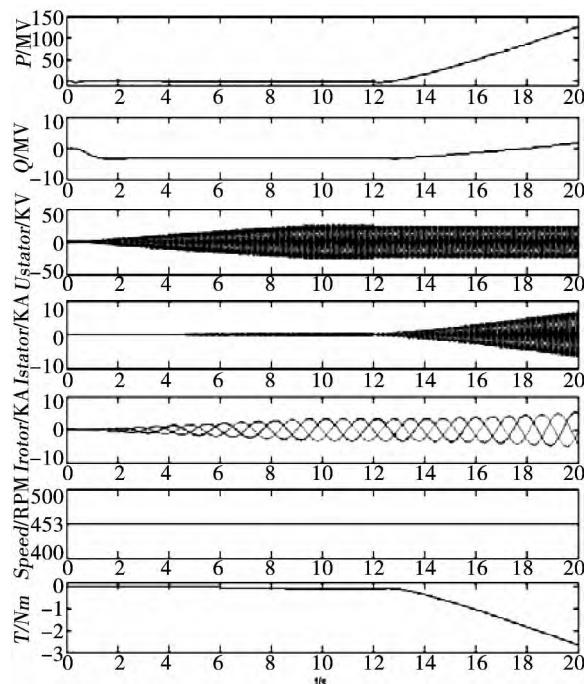


图 5 发电工况并网过程仿真波形

时间 0.05 s 时转速达到 450 r/min,机端开始建压。通过同期控制,到 1.2 s 时满足并网条件,并网并开始加功率,进入亚同步发电状态。由波形可知该控制策略从机端建压到同期并网时间较短,并网瞬间几乎没有冲击电流,整个过程转矩变化平稳。

亚同步到超同步的过渡过程如图 6 所示。从低于 500 r/min 的亚同步到 500 r/min 的同步再到 550 r/min 的超同步,转子电流频率从正到零再到负(见各相电流的超前滞后关系),过渡过程中功率变化平稳,转速变化平滑。

发电调相工况的发无功和吸无功时的仿真波形分别如图 7 和图 8 所示,功率变化平滑,并且在无功

增加时没有引起电压电流的突变。

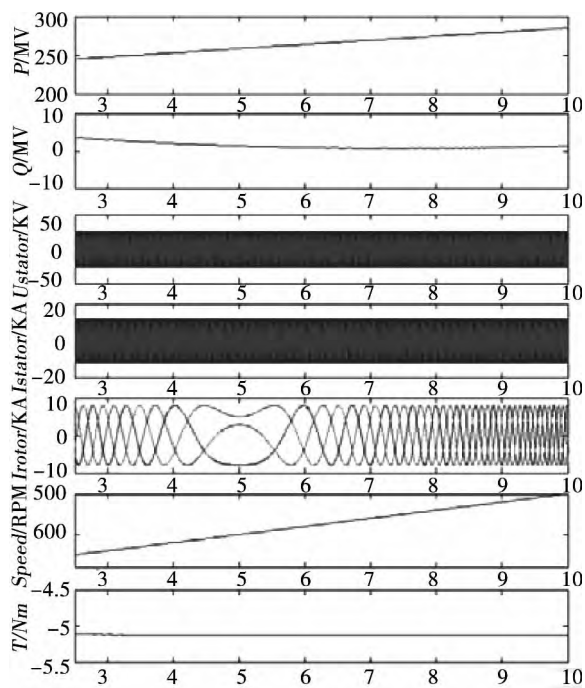


图6 发电工况亚同步向超同步过渡过程仿真波形

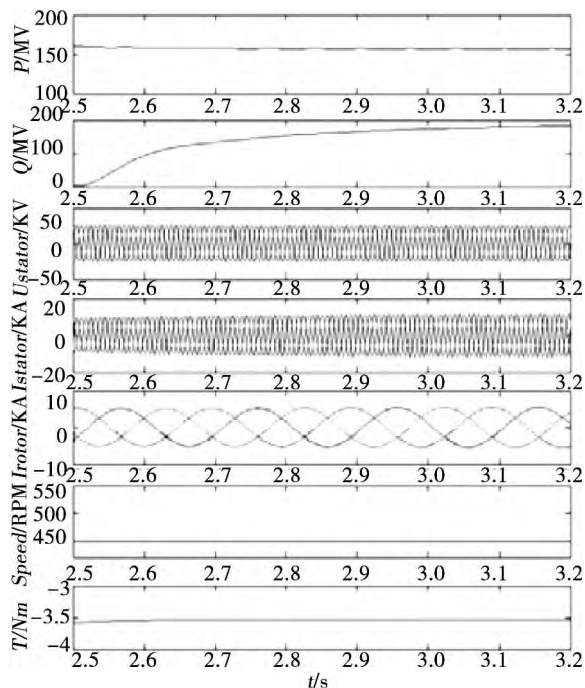


图7 发电调相过程(发无功)仿真波形

由仿真波形可知电机从静止到亚同步状态并网并加载需要大约 110 s 的时间,满足抽水蓄能机组启动的时间要求(SFC 启动同步机组的时间要求一般是 4 min 以内)。电机从静止加速到 450 r/min 需要 100 s 的时间,然后进入同期过程,在 100.07 s 时开始建压,100.28 s 时并网并加载。

抽水自启动过程仿真波形见图 9 所示。

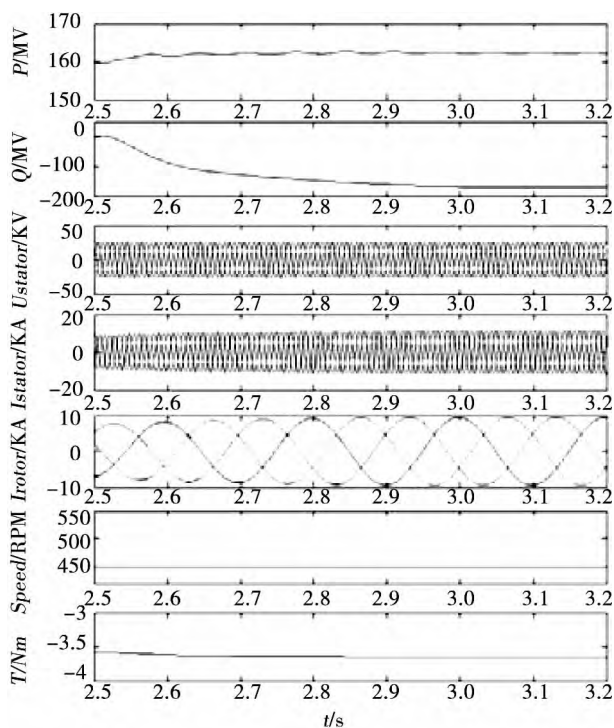


图8 发电调相过程(吸无功)仿真波形

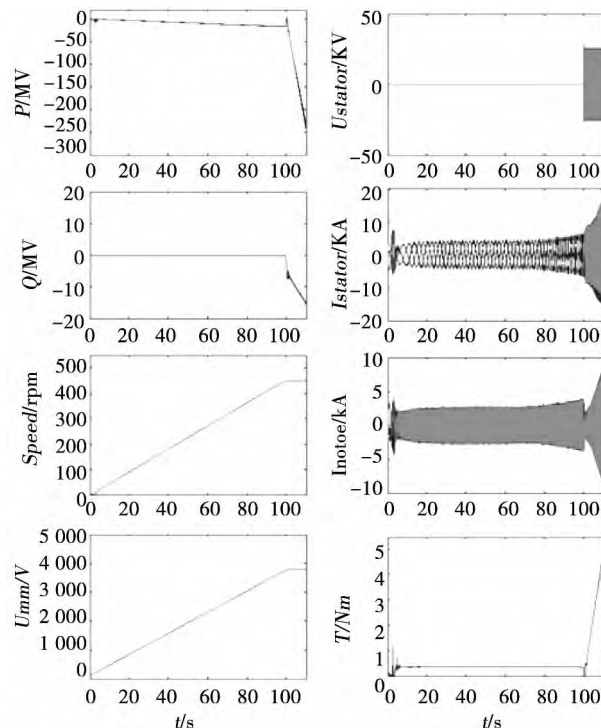


图9 抽水工况自启动过程仿真波形

电制动过程如图 10 所示。在 1.5 s 时发出停机令,开始降功率,2.17 s 时,定子脱网并短路。103 s 时转速降到 0,封脉冲,定转子电流降为 0。由图可以看出在电制动的过程中转速下降平稳,且制动过程

较快,符合抽水蓄能电站频繁启停的工况要求。

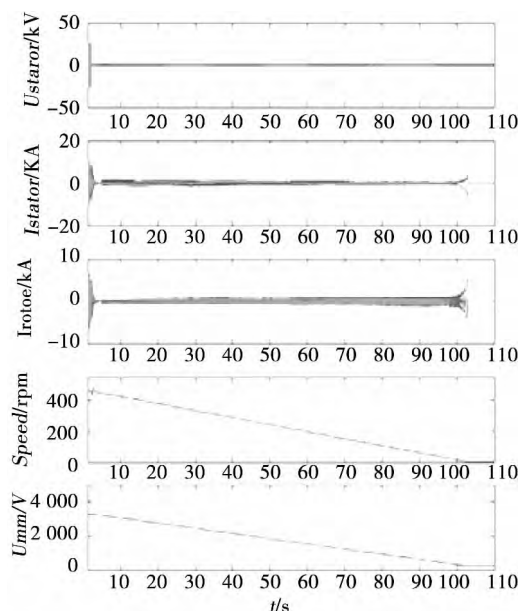


图10 电制动过程仿真波形

4 结 语

本文对抽水蓄能电站交流励磁机组的数学模型进行分析,提出在不同工况下网侧和转子侧的控制策略,并结合电站的实际运行情况对各工况下的控制策略进行仿真分析,仿真结果与电站满足电站的设计参数,证明了控制策略的适用性,为国内交流励磁机组的研究奠定了理论基础。

参 考 文 献:

- [1] 郭春平,余振. 关于中国抽水蓄能电站经济运行的一些思考[J]. 水电自动化与大坝检测,2011(3):1-3.
- [2] KITA E, BANDO A, KUWABARA T. 400 MW Adjustable Speed Pumped Storage Hydraulic Power Plant[J]. Hitachi Eview,1995,44:55-62.
- [3] 陈天城. 日本抽水蓄能电站建设中的新技术应用[J]. 电气技术,2013,16(3):118-121.
- [4] AGURO K. 日本可调速抽水蓄能系统丰富的运行经验和新技术[J]. 国外大电机,2009(2):1-5.
- [5] 郭海峰. 交流励磁可变速蓄能机组技术及应用[J]. 南方电网技术,2011,5(4):97-100.
- [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,2015,16(3):118-121.
- [7] 程光华. 抽水蓄能电站采用可变速机组的优越性[J]. 安徽电力,2002(2):33-34.
- [8] 倪安华. 交流励磁电机的应用和展望[J]. 上海大中型电机,2012(3):2-8.
- [9] 林瑞光,赵荣祥. 水轮发电机交流励磁变速运行的控制策略[J]. 电工技术学报,1995(8):1-5.
- [10] 郎永强,徐殿国, HADIANMERI S R,等. 交流励磁双馈电机分段并网控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014(10):133-138.
- [11] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频双馈型异步发电机的稳态功率关系[J]. 电工技术学报,2006(2):39-44.
- [12] 胡崇岳. 现代交流调速技术[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [13] 邱斌,简优宗. 负载电流检测型有源滤波器新的控制策略[J]. 电机与控制学报,2013(11):28-32.
- [14] 谭洪涛; 霍丽华; 戈宝军. 抽水蓄能电机变频启动时阻尼暂态电流的计算[J]. 电机与控制学报,2007(6):13-20.
- [15] 李辉,赵猛,叶仁杰. 电网故障下双馈电机暂态电流评估及分析[J]. 电机与控制学报,2010(8):13-20.
- [16] 张岳; 王凤翔. 磁障转子无刷双馈电机运行特性及实验研究[J]. 电机与控制学报,2014(2):13-20.
- [17] 张岳,王凤翔,邢军强等. 磁障转子无刷双馈电机[J]. 电工技术学报,2012(7):25-30.
- [18] 简优宗. 风力发电系统变流技术研究[J]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2011:14-16.
- [19] 姚俊,廖勇,李辉. 直驱永磁同步风力发电机单位功率因数控制[J]. 电机与控制学报,2012,14(6):13-20.
- [20] 何晓林. 水泵水轮机内部流动及水力特性[J]. 广州:华南理工大学,2012:38-40.
- [21] 刘星星. 水泵水轮机过渡过程半实物仿真平台的软件设计与实现[J]. 武汉华中科技大学,2013:42-45.

(编辑:温泽宇)