

# 交流励磁系统功率单元并联控制策略研究

陈旭东<sup>1</sup>, 衣传宝<sup>2</sup>, 来璐<sup>1</sup>, 高洪<sup>1</sup>, 梁廷婷<sup>2</sup>, 冯宇鹏<sup>1</sup>, 刘晔<sup>3</sup>

(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; 3. 国网浙江  
省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 多功率单元并联型交流励磁系统在励磁阶段存在相间环流, 导致系统不稳定。同时由于并联模块自身参数差异导致均流效果差。为了解决以上问题, 分析了其在励磁阶段和并网运行阶段控制上的差异性, 研究了多功率单元并联型交流励磁系统在励磁阶段产生相间环流的机理, 提出了一种适用于交流励磁系统多功率单元并联的混合控制策略。在 Matlab/Simulink 中搭建了 1 台 300 MW 的交流励磁控制可变速抽水蓄能机组系统, 仿真结果表明, 与传统的单一控制策略相比, 提出的混合控制策略能够在不增加变流器输出侧电感的前提下, 实现相间环流的抑制和均流效果的提高, 验证了所提控制策略的正确性及可行性。

**关键词:** 交流励磁; 功率单元并联; 相间环流; 混合控制

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19553

## Research on Parallel Control Strategy of the Power Unit Used in AC Excitation System

CHEN Xudong<sup>1</sup>, YI Chuanbao<sup>2</sup>, LAI Lu<sup>1</sup>, GAO Hong<sup>1</sup>, LIANG Tingting<sup>2</sup>, FENG Yupeng<sup>1</sup>, LIU Ye<sup>3</sup>

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, Henan, China; 2. State Grid Xinyuan  
Company Ltd., Beijing 100761, China; 3. State Grid Zhejiang Electric  
Power Company Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang, China)

**Abstract:** Multipower unit paralleling AC excitation system (AES) has the problem of interphase circulation flow, which leads to instability. Another problem is the poor average flow effect which caused by the parameters of the parallel converters. To solve the problems above, the differences between the excitation stage and grid-connected stage were analyzed. The mechanism of interphase circulation flow in multipower unit paralleling AC excitation system was studied. Finally, a hybrid control strategy was presented. The model of a 300 MW variable speed pumped storage plant was built in Matlab/Simulink. The results show that compared with the traditional unified control strategy, using hybrid control strategy can decrease the interphase circulation current and improve the effect of parallel average flow without increasing the inductance, and the correctness and feasibility of the proposed control strategy are verified.

**Key words:** AC excitation; multipower unit paralleling; interphase circulation; hybrid control

抽水蓄能电站以其经济、环保、高效、使用寿命长等特点, 成为目前世界上唯一成熟的超大规模物理储能方式, 在电网中具有调峰、填谷、调频、调相、事故备用等功能, 成为电力系统中的一个重要环节<sup>[1]</sup>。目前国内投运的抽水蓄能电站机组全部是定速抽水蓄能机组, 但是定速抽水蓄能机组由于转速固定, 在不同水头处不能始终运行在最优转速下, 这造成了一定的功率浪费<sup>[2]</sup>。

可变速抽水蓄能机组(variable speed pumped storage plant, VSPSP)采用变速恒频技术, 能够根据水头的变化灵活地调节电机转速, 同时兼顾出力要求实现恒频发电。由于该系统转速可变, 这使得在抽水工况下的输入功率变得连续可调, 为电网安全稳定提供更有力的保障<sup>[3]</sup>。

在 VSPSP 中, 交流励磁系统 (AC excitation system, AES) 是整个机组中最重要的部分。采用

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(521104180013)

作者简介: 陈旭东(1991—), 男, 硕士, 工程师, Email: 874956931@qq.com

双馈电机的抽水蓄能机组总容量一般在百 MW 级,转子变速范围在±10%以内,交流励磁系统提供转差功率,其容量大约为几十 MW<sup>[4]</sup>。受现阶段功率器件电压电流等级的限制,必须采用器件串联或多个功率单元并联的形式才能满足功率要求<sup>[5]</sup>。但是功率单元并联会带来环流问题,环流会增加系统损耗,降低系统稳定性。

文献[6]分析了并联 T 型三电平光伏并网逆变器的环流特性及抑制方法,但该方法只适用于并网运行阶段,不适用于交流励磁系统离网运行的励磁阶段。文献[7-8]针对三电平多机并联变流器离网与并网系统分别提出了集中控制和主从控制 2 种模式,但由于交流励磁系统输出端直接与双馈电机转子绕组相连,输出电压含有高频谐波,输出电压接近于 PWM 波,主从控制将不再适用。若单一使用集中控制,并联功率单元间均流效果由自身参数差异性决定,并联功率单元的均流效果差。文献[9-10]介绍了应用于永磁直驱风机的两电平并联变流器系统的控制策略,不能直接应用于三电平变流器并联系统中。

由于双馈电机在空载励磁阶段没有连接大电网,系统稳定性差,多台变流器并联更容易引起并联功率单元间的环流问题,导致电流发散、均流效果差。以上文献提出的控制策略将不再适用。为此,本文提出了一种适用于交流励磁系统多功率单元并联的混合控制策略。该控制策略在不增大输出侧电感的前提下实现相间环流抑制和模块间的均流控制,增大系统稳定性。

## 1 交流励磁系统

### 1.1 VSPSP 运行原理

VSPSP 系统接线示意图如图 1 所示,发电电动机为双馈电机,其定子通过开关接于三相电网,转子通过交流励磁系统功率变换后接入电网,水泵水轮机与发电电动机同轴连接。发电状态时,将水轮机的机械能转换为电能馈入电网,抽水状态时,将电能转换为水泵水轮机的机械能。

双馈电机转子变速范围在±10%以内,交流励磁机组满足下列关系:

$$n_0 = n + n_r \quad (1)$$

式中: $n_0$ 为定子磁场速度,对应于电网频率 $f_0$ ;  $n$ 为转子机械转速,对应于转子机械频率 $f$ ;  $n_r$ 为转子励磁磁场相对于转子的旋转速度,对应于交流励

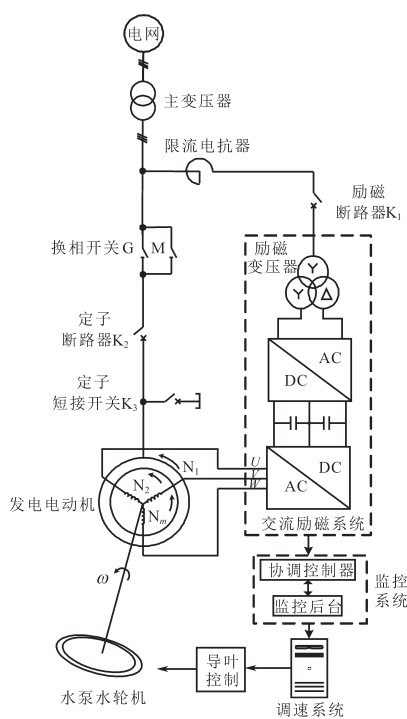


图1 VSPSP系统示意图

Fig.1 The system schematic of VSPSP

磁系统提供的转子电流频率 $f_r$ 。

即定子输出频率 $f_0$ 为转子机械频率 $f$ 与转子电流频率 $f_r$ 之和,因此当转子机械频率 $f$ 发生变化时,可以通过改变交流励磁系统输出频率 $f_r$ 来保证定子输出频率与电网统一频率同步,以适应不同水头的最佳转速。

### 1.2 交流励磁系统

VSPSP 交流励磁系统的结构框图如图 2 所示,机侧有  $n$  个功率单元并联,网侧  $2m$  个功率单元并联,网侧变流器用于稳定直流母线电压和直流母线中点电压平衡,机侧变流器为双馈电机转子提供励磁电流。

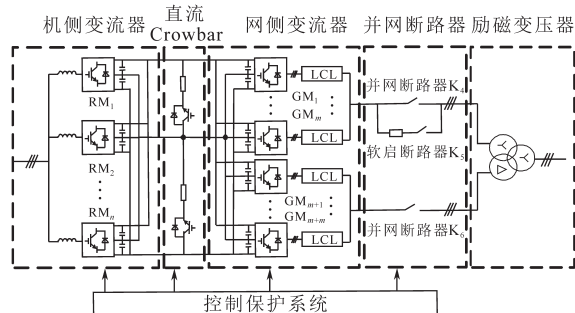


图2 交流励磁系统结构框图

Fig.2 The structure block diagram of AC excitation system

交流励磁系统的工作分为 2 个阶段:1)空载

励磁阶段:此阶段定子断路器未合闸,通过交流励磁系统控制发电电动机转子电流,使得定子电压与电网电压同步,为了并网合闸做准备。2)并网运行阶段:定子断路器已合闸,发电电动机定子电压为电网电压,通过交流励磁系统控制发电电动机的输出功率或转速。

## 2 交流励磁系统控制策略

以2台变流器并联为例,图3为机侧2台变流器并联连接至双馈电机的示意图。

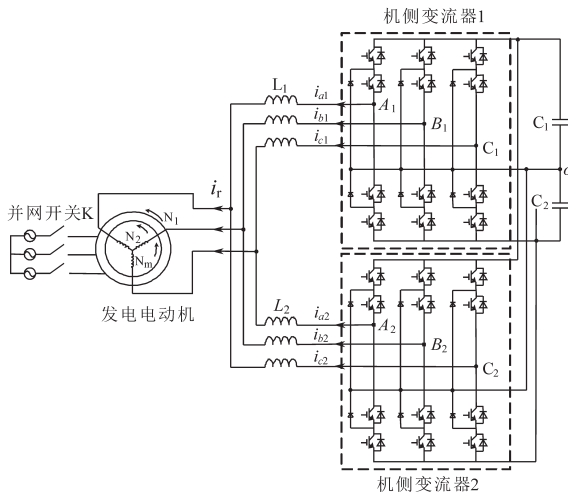


图3 机侧2台变流器并联图

Fig.3 Diagram of two parallel converters on motor side

无论机组工作在抽水工况还是发电工况,在启动阶段转子有一定转速后,首先要对双馈电机进行励磁控制。此时,图3中并网开关K断开,通过控制转子电流 $i_r$ ,使电机定子电压与电网电压幅值、频率、相位相同,以减少并网断路器K合闸期间的电流冲击。

由双馈电机模型可知,控制转子电流 $i_{rq}, i_{rd}$ 即可达到控制定子电压 $u_{sq}, u_{sd}$ 的目的,2台变流器并联时,使 $i_{d1} + i_{d2} = i_{rd}, i_{q1} + i_{q2} = i_{rq}$ 即可。

理想情况下,2台变流器电流均分时 $i_{d1} = i_{d2}$ 可以使单个功率单元流过的电流最小,减小功率单元额定容量。若并联模块间电流不均分会造成一个功率单元过流或电流应力过大,另一功率单元功率浪费。

$n$ 个并联功率单元,其均流系数 $k$ 的定义为: $n$ 条并联支路电流平均值与支路最大电流之比,即

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{nI_{\max}} \quad (2)$$

式中: $\sum_{i=1}^n I_i$ 为 $n$ 条并联支路电流的和; $I_{\max}$ 为并联支路中的电流最大值。

### 2.1 传统并联变流器控制策略

并联变流器的控制方法大体可以分为2种:1)统一控制策略,即所有并联单元的脉冲相同,控制目标为并联总电流,控制框图如图4a所示。其中 $i_{dref}$ 为功率单元 $d, q$ 轴电流给定; $i_{d\_sum}$ 为机侧各功率单元总电流; $n$ 为机侧并联功率单元个数。2)独立控制策略,即每个功率单元有自己的电流环,电流环反馈为单个模块输出电流,控制框图如图4b所示。其中 $i_{di}(i=1, 2, \dots, n)$ 为第 $i$ 个功率单元的输出电流反馈值。

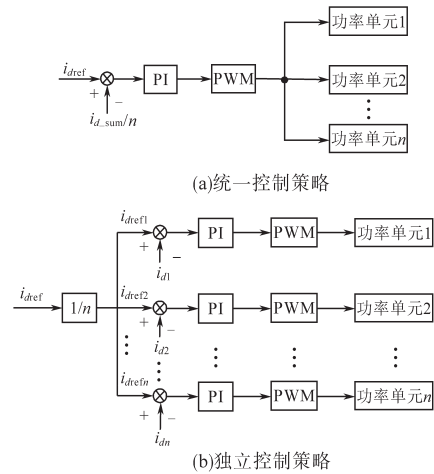


图4 传统并联变流器控制策略

Fig.4 Traditional control strategy of parallel converters

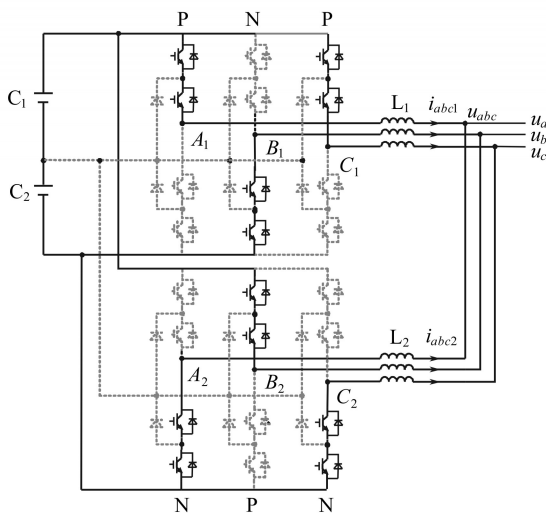
统一控制具有控制算法简单、所有并联功率单元只需要一个电流环的优点。然而其缺点是功率单元间的均流效果由功率单元参数的一致性决定。在进行均流控制时,需要考虑变流器输出侧电感感值偏差、功率器件开通、关断时间偏差、电路寄生参数偏差等因素。当功率单元硬件确定后,很难从软件上对以上偏差引起的电流不均流进行补偿。大功率系统中功率单元间电流不均流会引起某个模块电流过流,系统稳定性差。

在并网阶段独立控制具有各变流器之间相互解耦的优点,不受模块间参数差异的影响,达到电流均分的效果,多数并联并网变流器都选择独立控制的方式。但在空载励磁阶段,如图3所示,并网开关K处于分闸状态,电网定子电压没有钳位作用,定子电压随转子电流而改变,同理变流器并联点电压也随转子电流而改变,所以变流器并

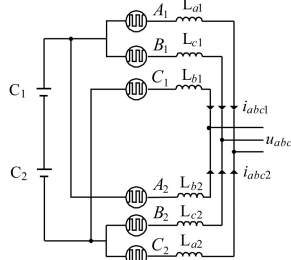
联点相当于一个弱电网,任意一个变流器输出电流的变化都会导致并联点电压变化。2台并联变流器都只有电流环控制,不能起到稳定并联点电压的作用,这最终将导致定子电压不可控。

### 2.2 相间环流机理分析

NPC 三电平变流器的桥臂输出有 P, O, N 3 种状态,其中 P 状态对应  $T_1, T_2$  管开通,  $T_3, T_4$  管关断,桥臂输出端与直流母线正极相连;O 状态表示  $T_2, T_3$  管开通,  $T_1, T_4$  管关断,桥臂输出端与直流母线中点相连;N 状态表示  $T_3, T_4$  管开通,  $T_1, T_2$  管关断,桥臂输出端与直流母线负极相连。离网下并联变流器相间环流示意图如图 5 所示。



(a) PNP, NPN 状态下相间环流图



(b) 相间环流简化图

图 5 离网下并联变流器相间环流示意图

Fig.5 Schematic of interphase circulation in parallel converter under off-gird

当空载励磁阶段使用独立控制时,2个并联变流器的开关状态可能存在差异。以变流器1的三相桥臂输出为 PNP 状态和变流器2的三相桥臂输出为 NPN 状态为例,对相间环流进行分析。2台变流器并联的连接图如图 5a 所示。由于空载励磁阶段转子电压  $u_{abc}$  不受电网钳位,2台变流器之间会形成图 5a 实线所示的电流路径,其中有 2 种环流路径。

路径 1:以变流器 1 正母线为起始点,经过  $A_1, C_1$  桥臂端口,流过电感  $L_{a1}, L_{c1}$ ,再到  $L_{a2}, L_{c2}$ ,最后从变流器 2 桥臂端口  $A_2, C_2$  汇入直流母线负端。

路径 2:以变流器 2 正母线为起始点,经过  $B_2$  桥臂端口,流过电感  $L_{b2}, L_{b1}$ ,最后从变流器 1 桥臂端口  $B_1$  流入直流母线负端。

图 5b 为图 5a 的简化电路,由于变流器输出电感值均相等,所以  $i_{b2} = -2i_{a2} = -2i_{c2}$ ,满足  $i_{a2} + i_{b2} + 2i_{c2} = 0$ ;  $-i_{b1} = 2i_{a1} = 2i_{c1}$ ,满足  $i_{b2} + i_{a2} + 2i_{c2} = 0$ 。该环流在 2 台变流器的三相之间流动,且每台变流器输出三相电流之和为零,不属于零序环流。根据下式可知,由于直流母线电压  $u_{dc}$  固定,该环流大小与变流器输出侧电感  $L$  的值及开关状态持续时间  $\Delta t$  相关。相间环流过大会影响功率单元控制效果,甚至模块电流发散。

$$\Delta i_b = \frac{u_{dc}}{2L} \Delta t \quad (3)$$

式中:  $\Delta i_b$  为环流。

由上述分析可知,减小空载励磁阶段相间环流的方案有 2 种。方案一:并联变流器保持相同脉冲,即采用统一控制,避免 2 台变流器开关状态不一致引起的相间环流。但该方案不能兼顾并联功率单元的均流效果,会导致均流效果差,造成功率浪费。方案二:采用独立控制,增大变流器输出侧电感,减小相间环流幅值。由于功率单元额定电流上 kA,增大输出侧电感感值将使功率单元体积、重量、成本增加数倍,不利于经济性。

### 2.3 并联变流器混合控制

为减小空载励磁阶段相间环流,本文提出并联变流器混合控制策略。混合控制策略为统一控制策略+独立控制策略。

空载励磁阶段采用混合控制中的统一控制策略,由于该阶段所需的励磁电流只占额定电流的 20% 左右,裕量较大,所以统一控制策略带来的不均流不会触发功率单元过流保护。在并网断路器合闸后,系统进入并网运行阶段,切换至混合控制中的独立控制策略,此时定子电压受电网电压钳位,实现了各功率单元之间的解耦。混合控制策略即控制方式切换如图 6 所示。在该阶段采用独立控制策略不会引起并联模块间的相间环流,且有利于功率单元间的均流控制。

基于以上分析,本文提出的混合控制策略能够很好地实现交流励磁系统多功率单元并联间的相间环流抑制和均流控制。

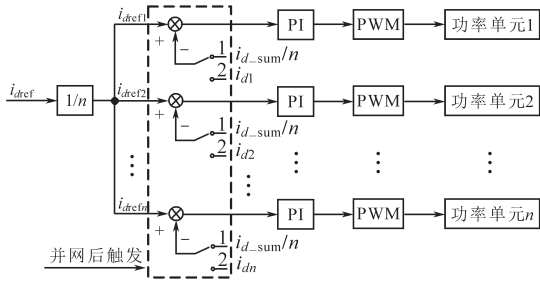


图6 交流励磁系统功率单元并联混合控制策略

Fig.6 Hybrid control strategy of multipower unit paralleling AES

### 3 仿真结果

为了验证上述控制策略的有效性,在Matlab/Simulink仿真平台上搭建图1所示仿真模型。仿真参数如下:机组容量为300kW,功率因数为0.9,电网电压为500 kV,转差范围为±10%,直流母线电压为5 400 V,网侧变流器容量为6×5 MW,机侧变流器容量为6×7 MW,转子电压范围为0~3 kV,机侧变流器输出侧电感为1 mH。

仿真时考虑以下几点不理想因素:1)各变流器输出侧电感值偏差±5%;2)功率单元输出电流采样偏差±3%;3)功率器件开通关断时间相差100 ns。

机组工作在超同步发电状态,转差率 $s=-0.1$ , $t=0.1$  s时开始网侧变流器稳压, $t=0.4$  s时启动机侧变流器, $t=2$  s时完成同期并网断路器合闸, $t=3\sim 3.5$  s加至满载。图7为机侧变流器输出侧电感为1 mH时采用独立控制的仿真结果,其中波形1~6为机侧并联功率单元1~6的输出电流,波形7为转子总电流,波形8为电网电压 $u_g$ 和发电机定子电压 $u_s$ 。

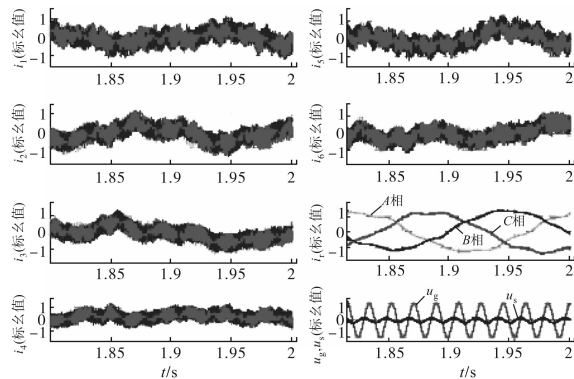


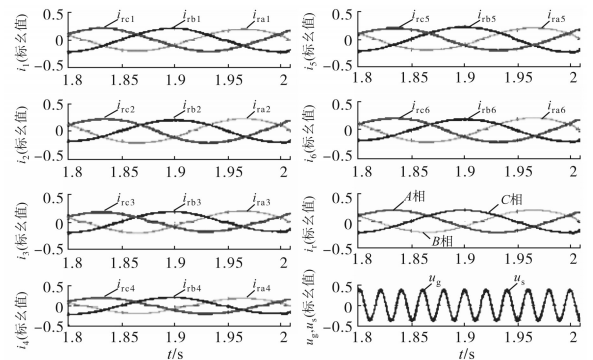
图7 采用独立控制空载励磁阶段仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms of independent control in no-load excitation stage

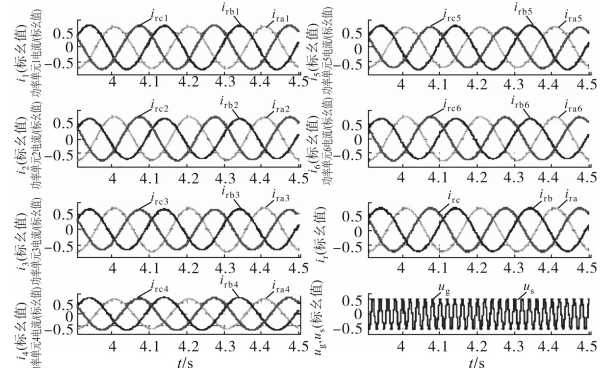
由图7可以看出,机侧变流器输出电感为1 mH

时采用独立控制策略,由于相间环流太大,模块输出电流不可控,转子总电流也未能跟随给定电流,定子电压与电网电压同期失败。改变输出侧电感值至少需要7 mH才能实现功率单元电流可控的目的,完成同期。

图8为1 mH输出电感下采用统一控制策略的仿真波形。可以看出,在并网断路器合闸前,电网电压 $u_g$ 和发电机定子电压 $u_s$ 完全重合,完成同期,且整个并网运行阶段,系统能够跟随功率指令。但稳态时并联功率单元的均流系数为0.90,均流系数低,造成部分功率单元输出电流较大,部分功率单元功率浪费。



(a)空载励磁阶段



(b)并网运行阶段

图8 采用统一控制策略仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms of unified control

图9为1 mH输出电感下采用混合控制策略的仿真波形。图9可以看出,混合控制也能达到统一控制的控制效果,且使用混合控制策略的均流系数为0.97,高于统一控制,2种控制策略下各功率单元电流标么值如表1所示。提高功率单元间均流系数即优化了并联功率单元的均流效果,有助于减小功率单元额定容量值的设计,减少硬件成本,增强系统的稳定性,避免造成功率的浪费。

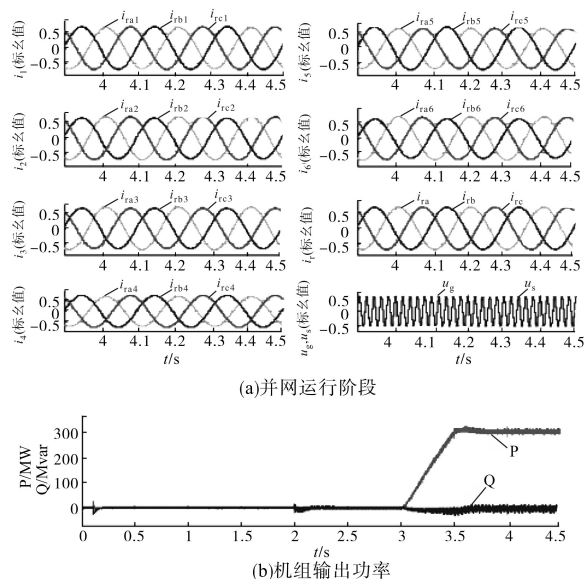


图9 采用混合控制策略仿真波形  
Fig.9 Simulation waveforms of hybrid control

表1 2种控制策略均流效果

Tab.1 Current-sharing effect of two control strategies

名称	统一控制	混合控制
功率单元1电流(标么值)	0.610 6	0.678 8
功率单元2电流(标么值)	0.722 2	0.699 0
功率单元3电流(标么值)	0.692 3	0.697 5
功率单元4电流(标么值)	0.625 6	0.660 3
功率单元5电流(标么值)	0.653 9	0.657 9
功率单元6电流(标么值)	0.747 8	0.687 1
电流平均值(标么值)	0.675 4	0.680 1
最大值(标么值)	0.747 8	0.699 0
均流系数	0.903 182 669	0.972 961 373

## 4 结论

本文提出一种适用于交流励磁系统的多功率单元并联控制策略,该控制策略能够在空载励磁阶段消除开关状态不一致带来的相间环流问

题。既能减小励磁阶段对变流器输出侧电感值得需求,又能够兼顾并网运行阶段对均流效果的要求。相比于单一使用统一控制策略,该策略将机侧变流器输出侧电感从7 mH减小到1 mH;相比于单一使用独立控制策略,该策略将均流系数从0.9提高至0.97。

### 参考文献

- [1] 张占安,蔡兴国.考虑可变速抽水蓄能机组运行特性的低碳调度[J].中国电机工程学报,2016,36(S1):51-60.
- [2] 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.
- [3] 罗骅,姜建国,刘贺.大功率变换器在可变速抽水蓄能电站中的应用[J].电力电子技术,2017,51(10):109-113.
- [4] 王婷婷,赵杰君,王朝阳.我国电网对抽水蓄能电站变速机组的需求分析[J].水力发电,2016,42(12):107-114.
- [5] Joseph A, Chelliah T R. A Review of Power Electronic Converters for Variable Speed Pumped Storage Plants: Configurations, Operational Challenges and Future Scopes[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2018,6(1):103-119.
- [6] 邢相洋,陈阿莲,张子成,等.并联T型三电平逆变器环流抑制和中点平衡研究[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3909-3919.
- [7] 李建林,徐少华,惠东.百MW级储能电站用PCS多机并联稳定性分析及其控制策略综述[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4034-4046.
- [8] 刘隽,赵玲,张建兴,等.基于主从式控制三电平变流器并联的储能系统[J].电气传动,2014,44(3):27-31.
- [9] Xu Zhuang, Li Rui, Zhu Hui, et al. Control of Parallel Multiple Converters for Direct-drive Permanent-magnet Wind Power Generation Systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012,27(2):1259-1270.
- [10] 韩刚,张健文,蔡旭.大功率风电变流器分布式控制方法的研究[J].电力电子技术,2013,47(10):22-24.

收稿日期:2018-09-26  
修改稿日期:2018-12-16