

## 大容量储能发电机并联运行励磁控制算法\*

刘金利, 翟小飞, 晏明

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北武汉 430033)

**摘要:**大容量储能发电机作为脉冲电源,整流后通过逆变器向大功率脉冲负载供电。采用储能发电机直流侧并联方式工作,可以有效提高系统带载能力与可靠性。当并联运行的储能发电机转速不同时,根据转速合理分配电机释放功率可以有效提高系统工作效能,因此需要设计一种具有功率调节功能的励磁控制算法。在电压、电流双闭环控制的基础上,引入功率前馈控制,推导并求解了前馈功率与励磁电流关系以及控制参数,并根据电机初始转速设计了功率分配算法。仿真试验结果表明,功率前馈控制在励磁控制过程中起主导作用,有效分配储能电机释放功率大小,提高了励磁电流响应速度,抑制了负载功率扰动对励磁控制系统的影响。

**关键词:**储能发电机; 并联运行; 励磁控制算法; 功率前馈控制; 脉冲负载

**中图分类号:**TM359 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)04-046-07

## Excitation control algorithm for high-capacity energy storage generator in parallel operation

LIU Jinli, ZHAI Xiaofei, YAN Ming

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** High-capacity energy storage generator can work as pulse power supply for large pulse power load through inverter after the energy storage generator's output rectified. The loaded ability and reliability of system can be improved effectively with energy storage generators working in parallel operation. Reasonably distributing the output power of energy storage generators working in parallel operation with different speed can effectively improve the performance of system. Therefore, it is necessary to design a kind of excitation control algorithm with power regulation function. The power feed-forward control was introduced on the basis of voltage and current closed-loop control, the relationship between load power and excitation current was deducted and the feed-forward control parameters were solved, and according to the energy storage generator initial speed, the load power distribution algorithm was designed. Simulation test results show that the power feed-forward control plays a leading role in excitation control, which can control the energy storage generator's output power and increase the excitation current response speed, and can inhibit the disturbance of load power on excitation system effectively.

**Keywords:** energy storage generator; parallel operation; excitation control algorithm; power feed-forward control; pulse load

随着电力电子技术的发展、碳纤维材料的广泛应用以及磁轴承技术的成熟,高能量密度和高功率密度的惯性储能技术得到了高速发展。大容量储能发电机因具有瞬时释放功率大、放电深度可控、使用寿命长、可靠性高、免维护等优点,常被用作短时大功率脉冲负载供电电源<sup>[1-2]</sup>。

大容量储能发电机以小功率、长时间存储能量,超大功率、短时间释放能量,循环工作于能量存储与能量释放过程。采用储能发电机并联运行可以有效提高系统储能容量,满足超大功率脉冲负载供电需求,同时并联运行的储能发电机互相

冗余备份,当其中一台发生故障时,通过切除故障电机可以有效保证系统安全性与可靠性,可应用于核聚变试验技术、等离子体和电磁发射技术等领域,具有广阔的应用前景<sup>[3-6]</sup>。

文献[7]对飞轮储能发电机并联运行时放电控制策略进行了研究,但文中储能发电机工作在长时稳态放电模式,控制策略不适用于短时脉冲大功率放电场合。文献[8]对国际空间站两台飞轮储能发电机并联于同一母线运行试验进行了介绍,但文中两台飞轮储能发电机工作模式为一台充电,另外一台放电,能量在两台储能发电机之间

\* 收稿日期:2018-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607186)

作者简介:刘金利(1988—),男,辽宁建平人,博士研究生,E-mail:821485724@qq.com;

翟小飞(通信作者),男,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:smartnavy@126.com

流动,控制策略并不适用于两台储能发电机同时放电的场合。对于大容量储能发电机并联运行向大功率脉冲负载放电时的励磁控制算法,国内外鲜见相关文献研究。

### 1 励磁控制系统结构

大容量储能发电机采用无刷励磁控制系统,励磁机结构为转枢式三相同步发电机。电枢绕组位于转子上,励磁绕组位于定子上,励磁机电枢绕组通过旋转整流器向主发电机励磁绕组提供励磁电流。图1给出了两台储能发电机并联运行励磁控制系统结构,可拓展应用于多台储能发电机并联运行。

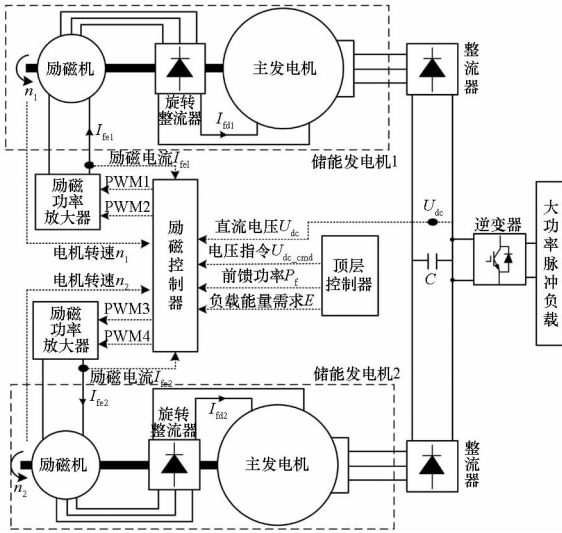


图1 励磁控制系统结构

Fig.1 Structure of excitation control system

顶层控制器根据负载需求,向励磁控制器发送直流电压指令、前馈功率、负载能量需求,其中前馈功率即为储能发电机输出功率,根据负载功率折算而来。励磁控制器根据接收到的控制指令以及采集的储能发电机转速信号、励磁电流信号,以及直流电压信号,通过励磁控制算法实时计算励磁功率放大器脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)脉冲占空比,进而控制储能发电机输出功率大小。

励磁功率放大器采用具有H半桥结构功率放大电路,该功率放大电路具有结构简单、可靠性高、励磁电流响应速度快等优点<sup>[7]</sup>。励磁功率放大器结构原理如图2所示。

图2中VT1和VT2为绝缘栅极双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT),VD1和VD2为续流二极管。励磁功率放大器中IGBT采用对称PWM脉冲控制策略,即采用两路占空

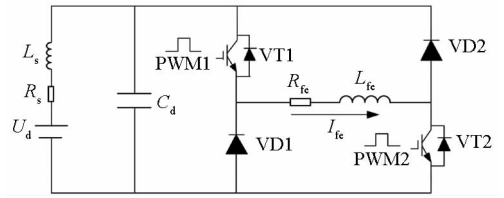


图2 H半桥式励磁功率放大器

Fig.2 H half-bridge excitation power amplifier

比相同,相位相差180° PWM脉冲控制IGBT,对称PWM可以有效减小励磁电流纹波<sup>[9]</sup>。H半桥励磁功率放大器控制状态如下:

S1:当VT1和VT2同时导通时,励磁电源向励磁绕组充电,励磁电流逐渐增加;

S2:当VT1导通,VT2关断时,励磁绕组经过VT1和VD2放电,励磁电流逐渐减小;

S3:当VT2导通,VT1关断时,励磁绕组经过VT2和VD1放电,励磁电流逐渐减小。

### 2 励磁控制算法

#### 2.1 前馈控制算法

在储能发电机并联运行系统中,励磁控制系统控制目标为稳定直流母线电压,电压闭环控制可以提高电压控制精度,电流闭环控制可以提高励磁电流响应速度<sup>[10]</sup>。为提高储能发电机并联系统工作效能,根据并联电机转速均衡分配功率,在电压与电流闭环的基础上引入功率前馈控制,功率前馈控制原理实际上就是从储能发电机直流侧输出功率入手,反向推导励磁机所需的励磁电流,即建立励磁机励磁电流与储能发电机输出功率之间数学方程。两台储能电机并联运行励磁控制策略框图如图3所示,可拓展应用于多台储能发电机并联运行。

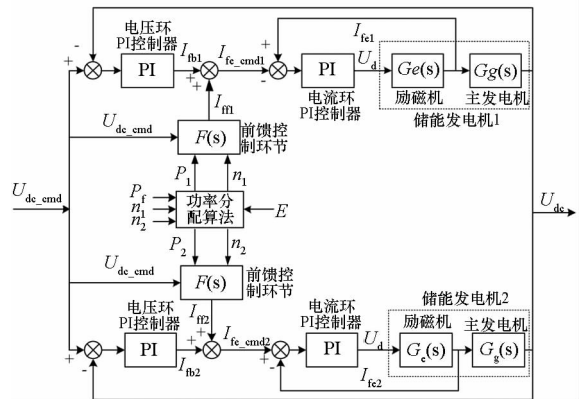


图3 励磁控制算法框图

Fig.3 Diagram of the excitation control algorithm

大容量储能发电机主发电机与励磁机均为隐

极同步发电机, 隐极同步发电机时空相量图如图 4 所示, 其中  $\dot{U}$  为电机端电压,  $\dot{i}$  为电枢电流,  $\dot{E}_0$  为励磁电势,  $\dot{E}_a$  为电枢电势,  $\dot{E}_\sigma$  为漏抗压降,  $\dot{i}R_a$  为电枢绕组电阻压降,  $\delta$  为功角,  $\varphi$  为负载功率因数角,  $\Phi$  表示磁通。不考虑电机饱和, 由于电枢绕组电阻压降和漏抗压降较小, 可忽略不计, 简化后隐极同步发电机时空相量图如图 5 所示, 图 5 中端电压  $\dot{U}$ 、励磁电势  $\dot{E}_0$  和电枢电势  $\dot{E}_a$  构成电压矢量三角形  $\triangle OAB$ 。

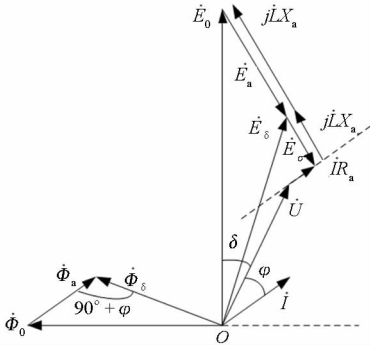


图 4 隐极同步发电机时空相量图

Fig. 4 Phase diagram of synchronous generator

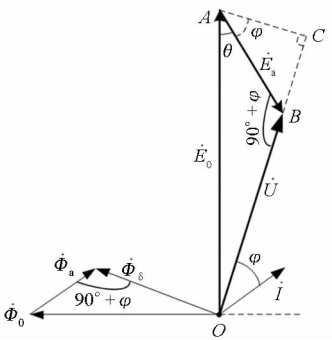


图 5 隐极同步发电机简化时空相量图

Fig. 5 The simplified phase diagram of synchronous generator

在电压矢量三角形  $\triangle OAB$  中, 由三角形余弦定理有

$$E_{0g} = \sqrt{U_g^2 + E_{ag}^2 + 2U_g E_{ag} \sin\varphi_g} \quad (1)$$

式中:  $U_g$  为主发电机端口电压;  $E_{ag}$  为主发电机电枢电势;  $E_{0g}$  为主发电机励磁电势, 参数下标  $g$  表示主发电机。

主发电机电枢电势  $E_{ag}$  与负载电流  $I_g$  之间关系为

$$E_{ag} = \omega_g L_g I_g = \frac{2\pi n p_g}{60} L_g I_g \quad (2)$$

式中,  $\omega_g$  为主发电机电角频率,  $L_g$  为主发电机同步电感,  $p_g$  为主发电机极对数,  $n$  为电机转速。

主发电机励磁电势  $E_{0g}$  与主发电机励磁电流

$I_{fd}$  之间关系为

$$I_{fd} = \frac{\sqrt{2}E_{0g}}{\omega_g M_{afdg}} = \frac{60\sqrt{2}E_{0g}}{2\pi n p_g M_{afdg}} \quad (3)$$

式中,  $M_{afdg}$  为主发电机励磁绕组与电枢绕组互感。

主发电机端口电压经过整流器构成直流母线电压, 与直流侧电压关系可以表示为

$$\begin{cases} U_g = k_{vg} U_{dc} \\ I_g = k_{ig} I_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $k_{vg}$  为主发电机交流侧基波相电压有效值与直流侧平均电压之间比例系数;  $k_{ig}$  为主发电机交流侧基波相电流有效值和直流侧平均电流之间比例系数。

根据式(1)~(4)简化求解可得

$$I_{fd} = k_g \left( \frac{U_{dc}}{k_{1g}} + \frac{I_{dc}}{k_{2g}} \right) \quad (5)$$

式中,  $k_g$  为主发电机励磁电流修正系数,  $k_{1g}$  为主发电机电压放大系数,  $k_{2g}$  为主发电机电流放大系数。其中  $k_g$  的表达式为

$$k_g = \sqrt{1 - \frac{2\omega_g L_g k_{vg} k_{ig} U_{dc} I_{dc} (1 - \sin\varphi_g)}{(k_{vg} U_{dc} + \omega_g L_g k_{ig} I_{dc})^2}} \quad (6)$$

$k_{1g}$  的表达式为

$$k_{1g} = \frac{2\pi p_g n M_{afdg}}{60\sqrt{2}k_{vg}} \quad (7)$$

$k_{2g}$  的表达式为

$$k_{2g} = \frac{M_{afdg}}{\sqrt{2}k_{ig} L_g} \quad (8)$$

式(5)根据隐极同步发电机相量图建立了储能发电机主发电机励磁电流  $I_{fd}$  与直流侧电压  $U_{dc}$ 、直流侧电流  $I_{dc}$  之间关系表达式。同理, 励磁机励磁电流  $I_{fe}$  与旋转整流器直流侧电压  $U_{fd}$ 、直流侧电流  $I_{fd}$  之间的关系表达式可以表示为

$$I_{fe} = k_e \left( \frac{U_{fd}}{k_{1e}} + \frac{I_{fd}}{k_{2e}} \right) \quad (9)$$

式中,  $k_e$  为励磁机励磁电流修正系数,  $k_{1e}$  为励磁机电压放大系数,  $k_{2e}$  为励磁机电流放大系数。其中  $k_e$  的表达式为

$$k_e = \sqrt{1 - \frac{2\omega_e L_e k_{ve} k_{ie} U_{fd} I_{fd} (1 - \sin\varphi_e)}{(k_{ve} U_{fd} + \omega_e L_e k_{ie} I_{fd})^2}} \quad (10)$$

$k_{1e}$  的表达式为

$$k_{1e} = \frac{2\pi p_e n M_{afde}}{60\sqrt{2}k_{ve}} \quad (11)$$

$k_{2e}$  的表达式为

$$k_{2e} = \frac{M_{afde}}{\sqrt{2}k_{ie} L_e} \quad (12)$$

旋转整流器直流侧电压  $U_{fd}$  与电流  $I_{fd}$ , 即主

发电机励磁电压与励磁电流,两者关系表达式为

$$U_{fd} = I_{fd} R_{fd} + p\psi_{fd} \quad (13)$$

式中, $p$ 为微分算子, $\psi_{fd}$ 为主发电机励磁磁链。

联立式(5)、式(9)、式(13)并进行简化,建立励磁机励磁电流  $I_{fe}$  与主发电机直流侧电压  $U_{dc}$ 、直流侧电流  $I_{dc}$  之间关系表达式,则

$$I_{fe} = k_e k_g \left( \frac{U_{dc}}{K_v} + \frac{I_{dc}}{K_i} \right) + \Delta I_{fe} \quad (14)$$

式中, $K_v$ 为储能发电机直流电压放大系数, $K_i$ 为储能发电机直流电流放大系数,二者均与电机转速相关。

分析式(14)可知,储能发电机励磁电流主要由三部分构成,一部分用于建立直流电压,一部分用于提供直流负载电流,一部分用于补偿励磁电流变化时在励磁绕组电感上损耗的励磁压降。

由于储能发电机向负载放电时,电机参数随着电机转速不断变化,通过理论求解电压放大系数  $K_v$  与电流放大系数  $K_i$  难度较大。因此,采用实验方法求解控制参数,根据式(14)通过对储能发电机直流侧输出开路与短路时励磁电流进行叠加修正,等效求解储能发电机实际带载时励磁电流,等效求解励磁电流公式为

$$I_{fe} = K_f I_{fe\_max} = K_f (I_{fe0} + I_{fes}) \quad (15)$$

式中, $K_f$ 为励磁电流修正系数, $I_{fe0}$ 为储能发电机输出开路时励磁电流, $I_{fes}$ 为储能发电机输出短路时励磁电流。

根据储能发电机仿真模型,通过开路仿真实验建立不同转速条件下开路励磁电流  $I_{fe0}$  与直流侧空载电压  $U_{dco}$  的关系,则

$$I_{fe0} = \frac{U_{dco}}{K_v(n)} \quad (16)$$

通过短路仿真实验建立不同转速条件下短路励磁电流  $I_{fes}$  与短路电流  $I_{dcs}$  之间的关系

$$I_{fes} = \frac{I_{dcs}}{K_c(n)} \quad (17)$$

通过开路仿真实验与短路仿真实验获取电压放大系数  $K_v(n)$ 、电流放大系数  $K_c(n)$  与转速  $n$  关系拟合曲线如图6所示,图中均采用标么值(p.u)表示。

根据式(15)~(17)可知,

$$I_{ff} = K_f \left[ \frac{U_{dc\_cmd}}{K_v(n)} + \frac{I_{dc\_cmd}}{K_c(n)} \right] \quad (18)$$

并将前馈功率  $P_f = U_{dc} I_{dc}$  代入式(18),储能发电机前馈控制方程可以表示为

$$I_{ff} = K_f \left[ \frac{U_{dc\_cmd}}{K_v(n)} + \frac{P_f / U_{dc\_cmd}}{K_c(n)} \right] \quad (19)$$

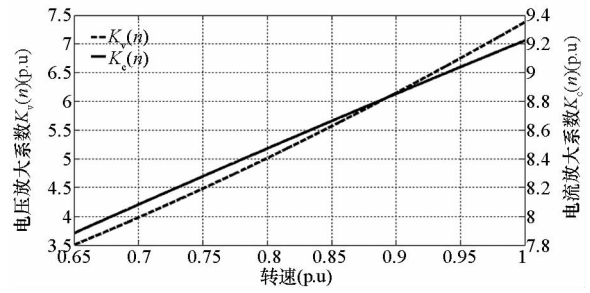


图6 不同转速下  $K_c$  与  $K_v$  值

Fig. 6 Values of  $K_c$  and  $K_v$  at different speed

根据储能发电机实际带载仿真实验可以求解修正系数  $K_f$ ,通过仿真实验发现不同负载条件下,修正系数变化范围较小。在控制过程中,修正系数取值为额定工况时求解数值,控制算法中电压放大系数与电流放大系数通过实时查表法获取。

## 2.2 功率分配算法

由于储能发电机并联运行系统循环工作在周期充电与放电模式,并联运行的储能发电机充电时电机升速时间由转速最低的储能发电机决定,为提高系统效能,缩短储能发电机升速时间,需对并联储能发电机释放功率进行合理分配。当初始转速不同的储能发电机并联运行向脉冲负载放电后,若并联储能发电机放电末转速相同,则既可以实现存储能量多的储能发电机释放能量多,存储能量少的储能发电机释放能量少,又可以减小下一次放电前储能发电机升速时间,有效提高系统工作效能。因此,转速不同的储能发电机并联向负载放电时,以放电末转速相同为原则进行功率分配。

储能发电机存储能量可以表示为

$$E_s = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (20)$$

式中, $J$ 为储能发电机转动惯量, $\omega$ 为储能发电机角速度。

根据电机转速与角速度关系可以推导储能发电机存储能量与电机转速之间的表达式为

$$E_s = k n^2 \quad (21)$$

式中, $k$ 为储能电机能量存储系数,计算公式为

$$k = \frac{1}{2} J \left( \frac{2\pi}{60} \right)^2 \quad (22)$$

假设储能发电机释放能量时初始转速为  $n_0$ ,储能电机能量释放完成时转速为  $n_1$ ,则储能发电机释放能量为

$$E_R = k(n_0^2 - n_1^2) \quad (23)$$

设并联运行储能发电机能量释放时初始转速分别为  $n_{01}, n_{02}, \dots, n_{0m}$ ,放电末转速为  $n$ ,则每台

储能发电机释放能量表达式为

$$E_i = k(n_{0i}^2 - n^2) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (24)$$

式中,  $m$  为并联运行储能发电机台数。

根据负载总能量需求  $E$  可以推导并联储能发电机放电末转速为

$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m n_{0i}^2}{m} - \frac{E}{km\eta}} \quad (25)$$

式中,  $\eta$  为系统效率。

并联运行储能发电机释放功率分配系数为

$$k_x = \frac{P_x}{P_t} = \frac{\eta E_x}{E} = \frac{n_{0x}^2 - n^2}{\sum_{i=1}^m n_{0i}^2 - mn^2} \quad x = 1, 2, \dots, m \quad (26)$$

式中,  $k_i \geq 0 (i = 1, \dots, m)$ , 当储能发电机功率分配系数计算结果为 0 时, 该储能发电机不放电。

为防止储能发电机低转速放电时对电机造成损坏, 设储能发电机转速限幅为  $n_L$ , 即当电机转速低于  $n_L$  时禁止放电, 设储能发电机能量限幅为  $E_L$ , 即储能发电机转速从初始转速  $n_0$  到转速限幅  $n_L$  时, 储能发电机能够释放的能量, 储能发电机能量限幅计算公式为

$$E_L = k(n_0^2 - n_L^2) \quad (27)$$

当并联运行的储能发电机中一台发生故障, 为保证系统安全性与可靠性, 需要切除故障电机输出, 此时负载能量需求全部由正常储能发电机承担。当并联运行储能发电机台数大于 2 时, 由于储能发电机向负载放电时间仅持续 3~4 s, 连续发生多台储能发电机故障的概率可以忽略不计, 因此并联运行储能发电机放电前能量限幅要求为

$$E_{Li} \geq \frac{E}{\eta(m-1)} \quad i = 1, 2, \dots, m; m \geq 2 \quad (28)$$

### 3 仿真实验

在 MATLAB/Simulink 仿真环境中搭建了 2 台储能发电机并联运行带大功率脉冲负载仿真模型, 对具有功率前馈控制的励磁控制算法以及功率分配算法进行仿真验证, 试验结果均采用标么值(p.u.)表示。

#### 3.1 2 台储能发电机充放电仿真实验

对 2 台并联储能发电机循环工作于能量存储与能量释放过程进行仿真, 2 台储能发电机初始转速不同, 储能发电机 1 初始转速为 2.0(p.u.), 储能发电机 2 初始转速为 1.9(p.u.)。储能发电机第一次放电完成后, 经过升速后进行第二次放

电。并联运行储能发电机输出功率仿真波形如图 7 所示, 并联运行储能发电机转速仿真波形如图 8 所示。

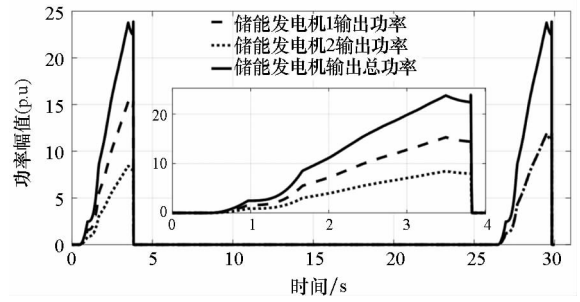


图 7 并联运行储能发电机输出功率波形

Fig. 7 Output power of energy storage generators

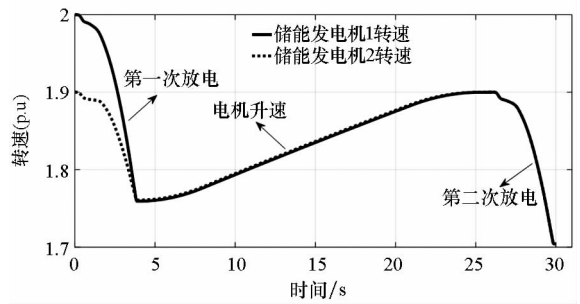


图 8 并联运行储能发电机转速波形

Fig. 8 Speed of energy storage generators

由图 7 与图 8 可以看出, 在励磁控制算法以及功率分配算法的作用下, 第一次放电时初始转速高的储能发电机释放功率大, 且两台初始转速不同的储能发电机在功率分配算法的作用下, 储能发电机放电末转速基本一致。第二次放电时两台电机初始转速相同, 两台储能电机输出功率相同。

并联运行储能发电机励磁电流仿真波形如图 9 所示。

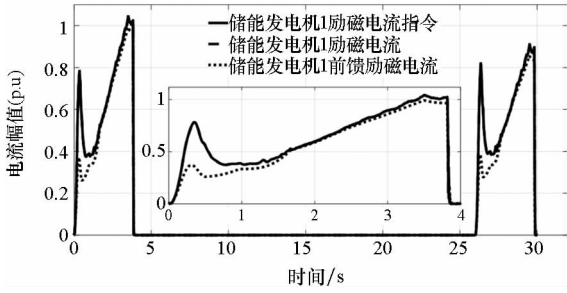
由图 9 可以看出, 励磁调节过程中, 励磁电流与励磁电流指令误差很小, 二者基本重合。储能发电机励磁电流大小受前馈功率控制, 且功率前馈控制在励磁控制中起主导作用, 有效提高了励磁电流响应速度。

并联运行储能发电机直流侧电压仿真波形如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 励磁控制算法可以实现稳定直流母线电压控制目标, 且控制精度较高。

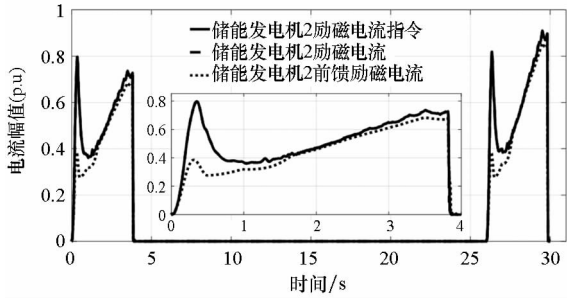
#### 3.2 1 台储能发电机放电时突发故障仿真实验

当 2 台并联运行的储能发电机放电时 1 台突发故障, 为保证系统安全性, 系统将切除故障电机输出, 负载所需功率全部由正常储能发电机承担。



(a) 储能发电机1励磁电流波形

(a) Excitation current of energy storage generator 1



(b) 储能发电机2励磁电流仿真波形

(b) Excitation current of energy storage generator 2

图9 并联运行储能发电机励磁电流仿真波形  
Fig.9 Excitation current of energy storage generators

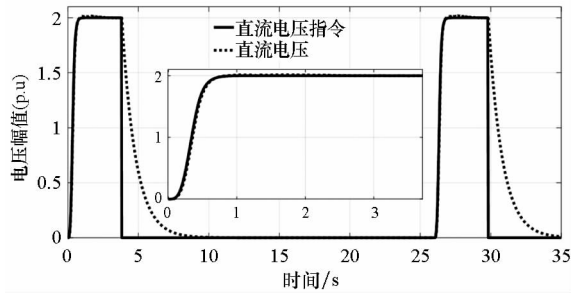


图10 直流侧电压仿真波形

Fig.10 DC side voltage of energy storage generators

仿真实验中2台储能发电机初始转速不同,储能发电机1初始转速为2.0(p.u.),储能发电机2初始转速为1.9(p.u.)。对 $t=3\text{ s}$ 时,储能发电机2突发故障进行仿真,并联储能发电机输出功率仿真波形如图11所示。

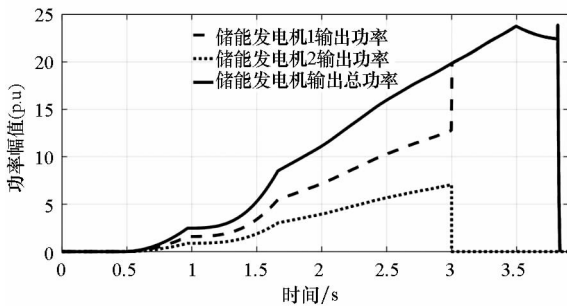
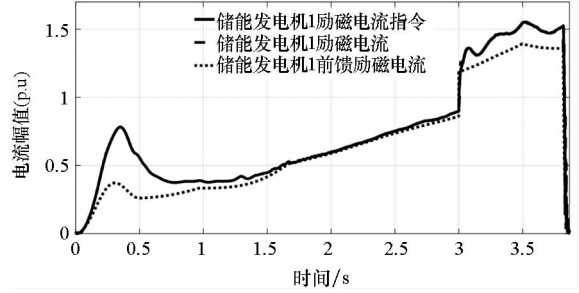


图11 并联运行储能发电机输出功率波形

Fig.11 Output power of energy storage generators

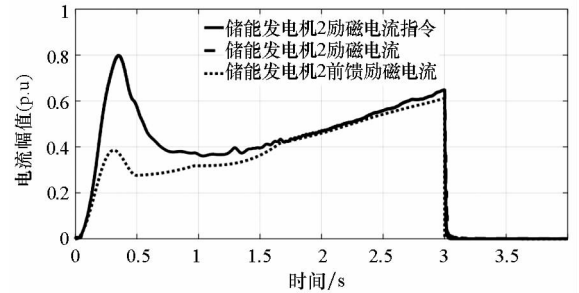
由图11可以看出,储能发电机2在 $t=3\text{ s}$ 时发生故障被系统切除,负载所需功率均由储能发电机1承担,此时储能发电机1输出功率发生阶跃。

并联运行储能发电机励磁电流仿真电流波形如图12所示。



(a) 储能发电机1励磁电流

(a) Excitation current of energy storage generator 1



(b) 储能发电机2励磁电流

(b) Excitation current of energy storage generator 2

图12 储能发电机励磁电流

Fig.12 Excitation current of energy storage generators

由图12可以看出,励磁电流与励磁电流指令基本重合。由于储能发电机2在 $t=3\text{ s}$ 时被系统切除,因此励磁电流输出为零。储能发电机1输出功率发生阶跃,导致储能发电机1励磁电流发生阶跃,功率前馈控制有效提高了励磁控制系统的抗干扰能力。

并联运行储能发电机直流侧电压仿真波形如图13所示。

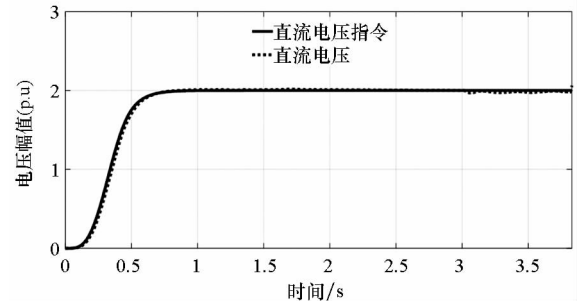


图13 直流侧电压波形

Fig.13 DC side voltage of energy storage generator

由直流侧电压仿真波形可以看出,并联运行储能发电机,当 1 台电机突发故障被系统切除后,在励磁控制的作用下,直流侧电压仍然保持稳定,满足系统工作要求。

## 4 结论

转速不同的储能发电机并联运行向负载放电时,为提高系统效能,需合理分配储能发电机释放功率,因此在电压闭环与电流闭环控制的基础上引入功率前馈控制。以并联运行储能发电机放电末转速一致为原则,对储能发电机输出功率进行分配,并根据负载需求能量计算了储能发电机功率分配系数,同时为提高系统安全性与可靠性计算了储能发电机放电时能量限幅条件。2 台储能发电机并联运行仿真实验表明,功率前馈控制与功率分配算法可以有效分配储能发电机释放功率,实现储能电机放电末转速一致,同时功率前馈控制在励磁控制中起主导作用,提高了励磁控制系统抗干扰能力,并提高了励磁电流响应速度,反馈控制对前馈控制误差进行补偿,提高了直流母线电压控制精度。

## 参考文献 (References)

- [1] 张维煜,朱焯秋. 飞轮储能关键技术及其发展现状[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 141-146.  
ZHANG Weiyu, ZHU Huangqiu. Key technologies and development status of flywheel energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 141-146. (in Chinese)
- [2] 戴兴建,邓占峰. 大容量先进飞轮储能电源技术发展状况[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 133-140.  
DAI Xingjian, DENG Zhanfeng. Review on advanced flywheel energy storage system with large scale[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 133-140. (in Chinese)
- [3] 马伟明,鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报,

2016, 38(6): 1-5.

- MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [4] 马伟明,肖飞,聂世雄. 电磁发射系统中电力电子技术的应用与发展[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 1-10.  
MA Weiming, XIAO Fei, NIE Shixiong. Applications and development of power electronics in electromagnetic launch system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 1-10. (in Chinese)
- [5] 欧阳斌,马伟明,王东,等. 大容量双六相储能电机系统建模与仿真[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(1): 92-97.  
OUYANG Bin, MA Weiming, WANG Dong, et al. Modeling and simulation of energy storage system with dual six-phase electrical machine of great capacity[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(1): 92-97. (in Chinese)
- [6] 晏明,马伟明,欧阳斌,等. 双九相储能电机系统性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3770-3775.  
YAN Ming, MA Weiming, OUYANG Bin, et al. Study on the characteristics of dual nine-phase energy storage electrical machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3770-3775. (in Chinese)
- [7] 黄宇淇,姜新建,邱阿瑞,等. 飞轮并联运行于放电模式时的控制策略[J]. 微电机, 2008, 41(5): 20-23, 32.  
HUANG Yuqi, JIANG Xinjian, QIU Arui, et al. Discharge control schemes for flywheels in parallel configuration[J]. Micromotors, 2008, 41(5): 20-23, 32. (in Chinese)
- [8] Truong L V, Wolff F J, Dravid N V, et al. Simulation of energy sharing among flywheels in parallel configuration[C]//Proceedings of 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 2002: 15-20.
- [9] 翟小飞,刘德志,欧阳斌,等. 对称 PWM 减小 H 半桥型开关功放电流纹波新方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 58-61, 67.  
ZHAI Xiaofei, LIU Dezhi, OUYANG Bin, et al. Current ripple reduction with symmetrical PWM for H-half bridge switching power amplifier[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 58-61, 67. (in Chinese)
- [10] American National Standards Institute. IEEE standard definitions for excitation systems for synchronous machines: IEEE Std 421.1-2007[S]. New York: IEEE Press, 2007.