

# 一种新型电力系统稳定控制装置

程时杰, 文劲宇, 潘 垣

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 提出了一种新型 FACTS 装置——多功能柔性功率调节器 (FPC), 它将飞轮储能技术和传统的同步调相技术有机地结合在一起, 同时采用交流励磁和矢量控制等先进技术进行控制。这种装置具有储能、发电、调相等多种功能, 将其用于电力系统的稳定性控制, 可实现动态有功功率和无功功率同时双向大范围的快速调节, 具有增强电力系统稳定性的能力。详细论述了柔性功率调节器的工作原理, 建立了装置的稳态等值电路模型, 分析了装置在不同运行方式下的功率传递关系。同时, 还介绍了 FPC 的一个主要组成部分——基于 SPWM 的双 VSC 变频控制器以及三相 SVC 的矢量控制原理。用数字仿真的方法研究了 FPC 与电网进行四象限功率交换的特性。最后, 用一个单机无穷大系统, 通过仿真分析, 验证了 FPC 所具有的巨大的稳定电力系统的能力。

**关键词:** 电力系统稳定控制; 柔性功率调节器; 飞轮储能; 同步调相机; 交流励磁

## Novel power system stability controller

CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu, PAN Yuan

(College of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A new kind of FACTS equipment, the multi-functional Flexible Power Conditioner (FPC), is proposed in this paper. The proposed equipment makes use of an advanced synchronous condenser with a flywheel, which is controlled by a vector technology based AC excitation system. Incorporating the functions of the synchronous condenser and flywheel energy storage, the proposed FPC can perform multi-functions including energy storage, dynamic active and reactive power conditioning when used in power system stability enhancement. This enables the proposed equipment to considerably enhance power system dynamic angular and voltage stabilities. The basic principles of the FPC, the steady state power exchanging characteristics between the FPC and the connected power network under different operating conditions, the SPWM based double voltage source converter used as a variable frequency power source for excitation, the vector control of the three phase VSC and the simulation results of contribution of the FPC in power system stability enhancement are all given.

**Key words:** power system stability control; flexible power conditioner; flywheel energy storage; synchronous condenser; AC excitation

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)01-0001-08

## 0 引言

功率平衡是电力系统稳定运行的基础。一旦因为扰动引起发电机或电力系统的功率失衡, 发电机组间或互联系统间就可能产生振荡, 威胁系统的稳定运行, 严重时可能会导致大面积停电事故<sup>[1-10]</sup>, 带来重大的经济损失和严重的社会影响。为了解决这个问题, 传统的方法是在发电机组的励磁系统上使用辅助稳定控制装置, 增加系统对于振荡的阻尼以抑制系统中由于扰动引起的振荡, 这种装置称为电力系统稳定器 (PSS)。其基本工作原理是采用适当的反馈信号, 通过有效的相位补偿环节, 产生与

机组转子摇摆中的阻尼分量相位一致的阻尼转矩。实践证明, PSS 的使用, 对电力系统中局部振荡模式的抑制非常有效。但是对于互联的大型电力系统, 存在非常复杂的振荡模式, 有的振荡模式可能与局部振荡模式相差甚远。这些复杂的振荡模式有时会给传统 PSS 的有效性带来不利的影响, 严重时甚至使其不能正常工作。PSS 必须通过发电机励磁控制装置才能起作用, 其使用地点有时会受到限制, 而且, PSS 的参数整定与需要补偿的相位有关, 而这常常是因系统而异的, 这些缺点也会在一定程度上限制它的灵活应用。

利用储能技术进行电力系统稳定控制是一条

稳定电力系统的新思路,它出于这种考虑,如果能够研制出这样的装置,使其可以在任何时候完全平衡掉系统中出现的不平衡功率,那么电力系统的稳定性问题将会得到根本性的解决<sup>[12]</sup>。最早将这一概念付诸实施的是使用超导磁储能装置(SMES)<sup>[13]</sup>。SMES 由一个置于低温环境的超导磁储能线圈组成,超导线材巨大的载流能力使它具有很高的储能密度,超导磁体所需要的低温工作环境由包含液氮或者液氮容器的深冷设备提供,由电力电子器件构成的功率变换/调节系统将 SMES 单元与交流电力系统相连接,并且可以根据电力系统的需要对储能线圈进行充放电。研究表明,由于 SMES 装置具有快速的电磁响应特性和很高的储能效率,它的使用可以大幅度提高电力系统的动态稳定性,是一个值得深入研究的方向。但就目前的技术发展水平看,由于 SMES 本身的造价昂贵,以及需要可观的维持低温所需要的费用,其规模化应用尚有困难。而且,由于 SMES 具有与传统电力设备不同的特点,如需要防止“失超”等,其设计、运行和维护与传统电力设备有很大的不同,其实际应用有待于深入的探索和相关科学技术的进步。

按照利用储能技术稳定电力系统的思路,本文提出了一种新的电力系统稳定控制装置,柔性功率调节器(FPC)。这种控制装置将目前已取得较大研究进展的飞轮储能技术用于电力系统稳定性控制,同时将飞轮储能和电力系统中的传统同步调相机相结合,使其同时具有动态有功和无功的双向调节能力<sup>[14-15]</sup>。由于这种装置具有较成熟的运行经验,便于分散安装,易于现场调整,可能成为一种理想的电力系统稳定控制装置。

## 1 柔性功率调节器的构成与可行性分析

本文提出的柔性功率调节器由 3 部分组成:一台具有很大转动惯量和采用交流励磁的变速恒频双馈储能电机、一台双 PWM 变频器的交流励磁电源、以及一套微机励磁控制系统,其构成如图 1 所示。储能电机的定子直接和电网相联,变频器安装在转子侧,励磁电源由电网直接供给。根据旋转动力学的基本原理,电机转子旋转时储存的动能为:

$$E = J(2\pi n/60)^2 / 2 = J\Omega^2 / 2$$

其中:  $J$  为转子的转动惯量,  $n$  为转子的每分钟转速,  $\Omega$  为角速度。

由电机学的基本理论知道,通过调节电机交流励磁电压的频率,可以改变发电机转子的转速以及所储存的动能,实现电机与系统间的有功功率交换。而且,由于电机转子储存的动能与电机转速的平方成正比,因此,通过调节电机转速实现对其储能的调节将会是非常有效的。

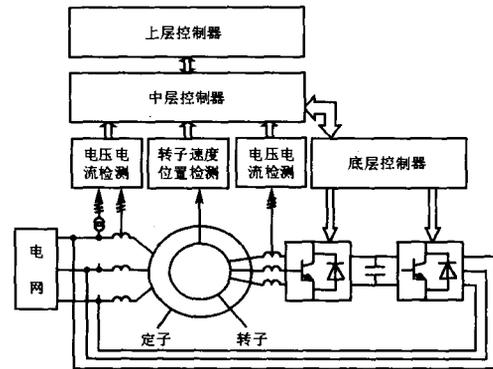


图 1 多功能柔性功率调节器的原理

Fig. 1 Principle of the proposed flexible power conditioner

用于 FPC 的双馈储能电机,其定、转子绕组均为三相对称绕组,它不带负载,电机没有原动机拖动,为了增加转子的转动惯量,可以在转子上增加适当飞轮。电机储能的大小与转子的转动惯量和转速有关,大半径的钢转子可以增加转子的转动惯量,其转速可达 10 000 rpm;新型复合材料的使用可使转子承受很高的转速,其转速可达 100 000 rpm。为了减少转子的旋转产生的轴摩擦损耗,可以采用磁浮轴承和真空技术。国内在飞轮储能系统上已有一定的研究基础<sup>[17~19]</sup>。

用于电力系统动态稳定控制的储能系统,应能够快速检测到系统中的不平衡功率,并及时对不平衡功率进行补充。对于电力系统动态稳定性来说,不平衡功率的变化周期通常在秒级的时间范围内,这就大大减轻了对储能系统储存能量的要求,有利于储能系统的实现。只要能够提高储能系统储存能量的变化速度,就可以实现大范围的功率补偿,这可以通过有效的控制方法实现。文献[20]提出了一种基于 DSP 的飞轮储能装置启动和充放电控制算法,试验结果表明,装置的功率响应时间在 100 ms 之内。

全控 PWM 变频器的应用可使本储能系统具有双向功率流动的功能,变频器由两个电压源型变流(VSC)器组成。其一端与电网并联,另一端与电机转子三相励磁绕组相连。变频器采用矢量控制技术,在微机励磁控制系统的控制下,可提供所需幅

值、频率和相位的励磁电流。变频励磁是比较成熟的一项技术, 在抽水蓄能机组和风力发电机组中已得到普遍应用<sup>[21~23]</sup>。与采用 SMES 的储能技术相比, 双馈储能电机的定子直接与电网相连, 转子侧只交换滑差功率, 因此, 变频器的容量与电机运行时的滑差有关, 进行适当的设计, 可以得到较好的实用性和经济性。

双馈储能电机励磁控制系统采用上层、中层和底层控制方式实现。其中, 上层控制器实施系统级的控制, 主要承担电网信息的采集, 在充分考虑 FPC 和电力系统其它主要设备间协调控制要求的条件下, 进行系统稳定性计算, 以确定需要双馈储能电机输出的有功功率和无功功率; 中层控制器根据上层控制器发出的功率指令, 选用相应的矢量控制策略, 得到转子变频交流三相励磁电压的指令值; 底层控制采用 PWM 技术, 实施相应的励磁控制。利用现有的技术实现这种励磁装置是有可能的<sup>[24]</sup>。

需要特别指出的是, 传统的同步调相机在电力系统已经被广泛用于提供无功功率补偿和电压支撑, 具有成熟的设计、运行和维护经验。本柔性功率调节器只需在传统的同步调相机基础上进行适当的改造就可以实现, 结果是它既可以像传统调相机一样进行电力系统无功功率的调节, 需要时, 也可以动态调节系统的有功功率。柔性功率调节器与同步调相机的这种相似性为它的实现、应用和推广提供了很好的基础。

## 2 FPC 的运行状态和与电网功率交换的特性分析

转子加速时, FPC 由电网吸收有功功率, 处于储能状态; 转子减速时, FPC 向电网释放有功功率, 处于发电状态; 转子恒速运行时, FPC 与电网之间没有有功功率的交换。在上述三种情况下, FPC 均可以向系统提供无功支持。本文考虑电机转差率  $s$  的大小, 将 FPC 的运行状态分为同步运行状态 ( $s=0$ )、亚同步运行状态 ( $0 < s < 1$ ) 和超同步运行状态 ( $s < 0$ )。以下分析各种运行状态下, FPC 与电网的功率传递关系。

### 1) 亚同步储能运行状态 ( $0 < s < 1, P_m > 0$ )

当 FPC 处于亚同步储能运行状态时, 由于转子转速小于气隙磁场的同步转速, 因而定子吸收的电磁功率不能全部转变为转轴上的机械功率增量, 部分功率将以转差功率的形式通过变流器回馈给电网, 但双馈储能电机从电网吸收的总功率大于 0,

这时转子加速, 储存的动能增加。这种情况下的功率流如图 2 所示。

### 2) 亚同步发电运行状态 ( $0 < s < 1, P_m < 0$ )

当 FPC 处于亚同步发电运行状态时, 其转子转速小于气隙磁场的同步转速, 因而转轴上的机械功率减小量小于电磁功率, 转子将从电网吸收一部分转差功率再通过定子反送回电网, 但双馈储能电机向电网释放的总功率大于 0, 这时转子减速, 转子动能减少。这种情况下的功率流如图 3 所示。

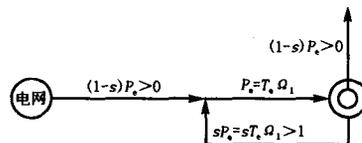


图 2 亚同步储能状态时的 FPC 功率流动图

Fig. 2 Power exchanging between FPC and power system at sub-synchronous energy storage state

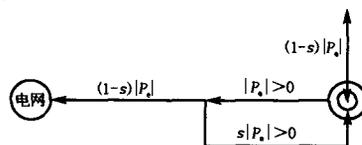


图 3 亚同步发电状态时的 FPC 功率流动图

Fig. 3 Power exchanging between FPC and power system at sub-synchronous power generation state

### 3) 超同步储能运行状态 ( $s < 0, P_m > 0$ )

在超同步储能运行状态下, FPC 的转子转速大于气隙磁场的同步转速, 因而定子馈入的电磁功率尚不足以提供全部的机械功率增加量, 转子还将通过变流器吸收作为差额的转差功率, 双馈储能电机将处于储能状态, 从电网吸收电能, 这时转子加速, 转子动能增加。FPC 处于超同步储能状态运行时的功率流如图 4 所示。

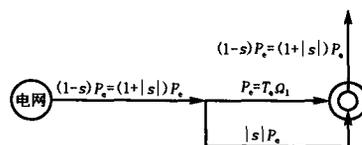


图 4 超同步储能状态时的 FPC 功率流动图

Fig. 4 Power exchanging between FPC and power system at super-synchronous energy storage state

### 4) 超同步发电运行状态 ( $s < 0, P_m < 0$ )

在超同步发电运行状态下, FPC 的转子转速大于气隙磁场的同步转速, 因而, 转子存储的机械功率减小量大于通过磁场传递给定子的电磁功率, 功率差额将作为转子转差功率回馈电网, 双馈储能电

机处于发电运行状态，向电网释放电能，这时转子减速，转子动能减少。FPC 处于超同步发电状态运行时的功率流如图 5 所示。

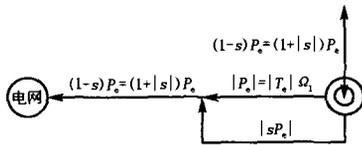


图 5 超同步发电状态时的 FPC 功率流动图

Fig. 5 Power exchanging between FPC and power system at super-synchronous power generation state

5) 调相运行状态 ( $P_m = 0$ )

调相运行状态是指双馈储能电机转子的转速保持恒定的运行状态，如果忽略各种损耗，此时 FPC 与电网没有有功功率的交换，转子轴上的合成转矩等于 0，相当于一台同步调相机。与同步调相机不同的是，理论上双馈储能电机转子可以稳定运行于任何转速下，但从实际运行时的安全及最大程度利用能量的角度出发，FPC 应该运行在传统同步调相机的调节方式下。

3 双 PWM 变频器工作原理及变流器的矢量控制策略

双 PWM 电压型变换器是目前比较理想的一种交流励磁电源，用于 FPC 的双 PWM 电压源型变换器必须在电力系统所有可能出现的各种运行状态下正常工作。图 6 给出 FPC 用双 PWM 电压源型变换器的基本结构。其中，电网侧变换器 VSC1 和转子侧变换器 VSC2 均为 PWM 变换器。FPC 的励磁控制主要通过 VSC2 实现，通过改变其正弦调制波的频率、相位和幅值可以改变输出交流励磁电压的频率、相位和幅值，实现对 FPC 交流双馈励磁电压的控制。VSC1 采用单位功率因数控制，其主要控制目的是维持两个变流器间直流电容上电压  $U_{dc}$  的恒定，完成由电网到 FPC 励磁绕组间的变频功率交换，实现相互之间的柔性连接。

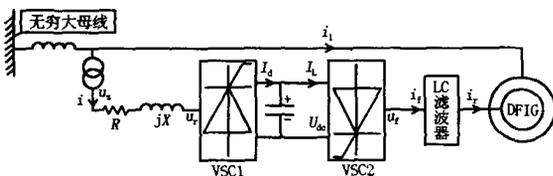


图 6 FPC 用双 PWM 电压型变换器的基本结构

Fig. 6 Basic configuration of FPC

关于 PWM 调制方法的工作原理，许多文献都有介绍，这里不赘述。它采用矢量控制策略实现，采用不同的开关组合，三相 VSC 的 3 对桥臂共可产生

8 个基本矢量，这 8 个基本矢量可以合成任意角度和模长的等效合成矢量  $\bar{V}_{ref}$ ，8 个电压矢量是断续的，但如果开关频率足够高，则可以在一个开关周期内，以其平均值为基准进行等效，这便是矢量调制的基本思路。如图 7 所示，恰当利用三相桥所能输出的 6 个非零矢量 ( $\bar{V}_1 \sim \bar{V}_6$ ) 与零矢量 ( $\bar{V}_0, \bar{V}_7$ ) 来合成一个等效的旋转空间矢量，通过调控  $\bar{V}_{ref}$  的频率、大小和相位与电网侧空间电压矢量相互作用可实现整流器的功率控制。

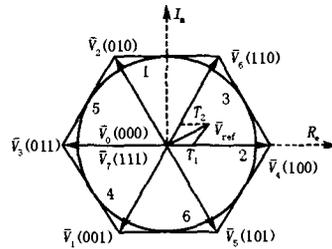


图 7 VSC 的空间矢量合成图

Fig. 7 Space vector diagram of the VSC

在一个开关周期  $T_s$  内，若两个相邻非零矢量 ( $\bar{V}_4, \bar{V}_6$  为例) 的作用时间分别是  $T_1, T_2$ ，零矢量的作用时间为  $T_0 = T_s - T_1 - T_2$ ，则由 PWM 的面积等效原理，有  $T_s \bar{V}_{ref} = T_1 \bar{V}_4 + T_2 \bar{V}_6$ ，调节  $T_1, T_2$  的比例可改变  $\bar{V}_{ref}$  的相位，改变  $T_1, T_2$  的大小，可调节  $\bar{V}_{ref}$  的幅值<sup>[8]</sup>。适当的将零矢量作用时间  $T_0$  插入到  $T_s$  中，可以减少开关动作次数、开关损耗和谐波。

4 FPC 功率调节特性的仿真研究

对 FPC 在电网中的运行特性进行了数字仿真分析。仿真分析用 FPC 与电网的连接如图 1 所示，其参数由表 1 给出。

对 FPC，给出了如下与电网功率交换的指令：

$$P^* = \begin{cases} 0, & 0 < t \leq 1.0 \text{ s} \\ -10, & 1.0 \text{ s} < t \leq 4.0 \text{ s} \\ 10, & 4.0 \text{ s} < t \leq 12.0 \text{ s} \\ -10, & 12.0 \text{ s} < t \leq 20.0 \text{ s} \end{cases}$$

$$Q^* = \begin{cases} 0, & 0 < t \leq 0.5 \text{ s} \\ 5, & 0.5 \text{ s} < t \leq 5.0 \text{ s} \\ -5, & 5.0 \text{ s} < t \leq 13.0 \text{ s} \\ 0, & 13.0 \text{ s} < t \leq 20.0 \text{ s} \end{cases}$$

表 1 FPC 的参数  
Tab.1 Parameters of the FPC

参数	变量	数值
额定功率	$P$	10 kW
定子额定电压	$U_N$	800 V
定子额定频率	$f$	50 Hz
极对数	$P$	3
同步转速	$n_1$	1 000 r/min
额定转速	$n_N$	973 r/min
转差范围	$s$	$-0.5 < s < 0.5$
额定功率因数	$\phi_N$	0.816
定子相电阻	$R_s$	1.581 8 $\Omega$
转子相电阻折算值	$R_r$	1.479 7 $\Omega$
定子相漏感	$L_{\sigma s}$	0.008 55 H
转子相漏感折算值	$L_{\sigma r}$	0.013 95 H
互感	$L_m$	0.313 95 H
转子和飞轮的总转动惯量	$J$	18.992 2 kg·m <sup>2</sup>
定子和转子绕组接法		Y

在以上交换功率的指令的作用下, FPC 各有关变量的响应特性如图 8~图 15 所示。

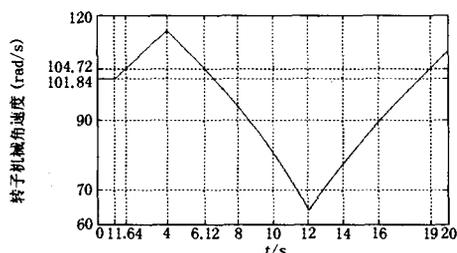


图 8 转子机械角速度

Fig. 8 Rotor speed

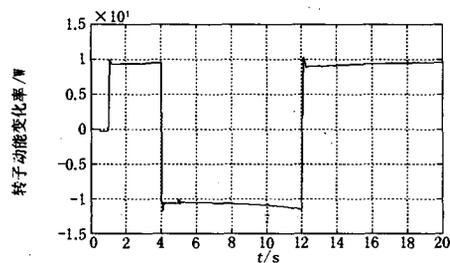


图 9 转子动能变化率

Fig.9 Rotor energy variation

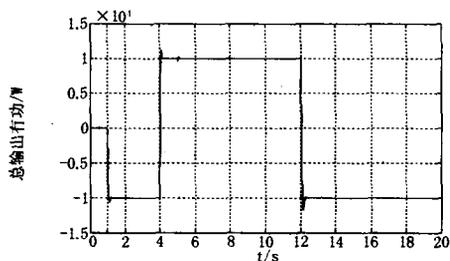


图 10 总输出有功

Fig. 10 Total active power output of FPC

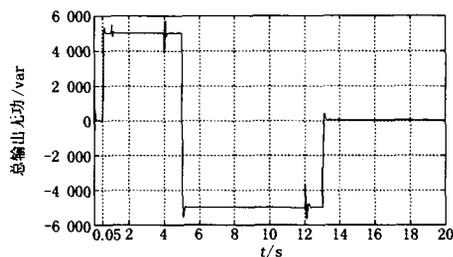


图 11 总输出无功

Fig. 11 Total reactive power output of FPC

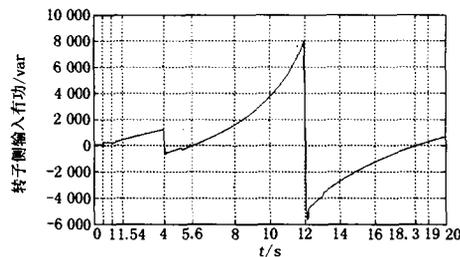


图 12 转子侧输入有功

Fig. 12 Active power input of rotor

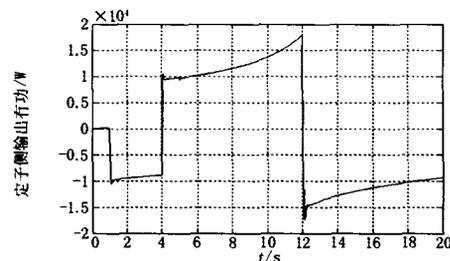


图 13 定子输出有功

Fig. 13 Active power output of stator

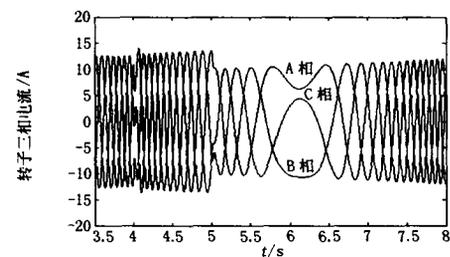


图 14 转子侧电流

Fig. 14 Rotor current

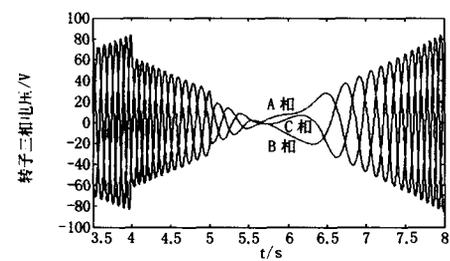


图 15 转子侧电压

Fig. 15 Rotor voltage

以上仿真结果表明, FPC 可以很好地跟踪功率调节的指令。图 16 和图 17 给出当  $t=4.0\text{ s}$  及  $t=5.0\text{ s}$  有功和无功功率指令分别发生阶跃变化时, 双馈储能电机输出的总有功功率和总无功功率的响应曲线和其 P-Q 相平面图。

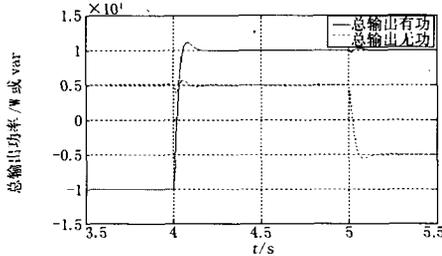


图 16 FPC 阶跃响应曲线  
Fig. 16 Step-up test response of FPC

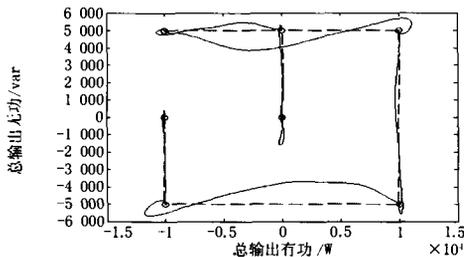


图 17 FPC 的 PQ 调节相平面图  
Fig. 17 PQ regulation trajectory of FPC

由图 16 和图 17 可以看出, 在功率调节过程中, FPC 的响应具有一定的时间滞后, 因此在为其设计控制器时, 应该考虑这种时间滞后的动态过程。

### 5 利用 FPC 提高电力系统稳定性的仿真研究

为了深入研究本文提出的 FPC 对提高电力系统稳定性的作用, 建立了图 18 所示的单机对无穷大电力系统, FPC 安装在发电机出口升压变压器高压侧母线上。

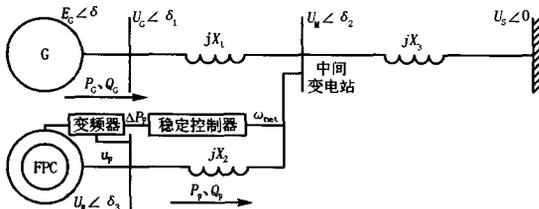


图 18 具有 FPC 的单机无穷大系统  
Fig. 18 Single-machine infinite bus system with FPC

FPC 的控制器可采用发电机转速对同步速的偏差作为输入信号, 控制器输出反映系统的不平衡有功功率, 如图 19 所示。如果将 FPC 用于抑制联络线上的功率振荡, 可用 FPC 安装地点的电网频率偏差, 或直接采用功率的偏差作为输入信号。也可以在此控制环节上增加无功调节控制信号, 实现 FPC

与电网间的四象限功率交换。

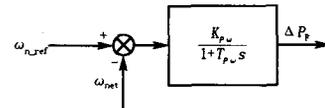


图 19 FPC 的控制  
Fig. 19 Controller of the FPC

系统的参数见表 2, 其中 FPC 的参数见文献 [25]。FPC 接在线路中间变电站的母线上。发电机励磁系统采用 IEEE 规定的标准 AC1A 模型, 其参数采用 PSCAD 的默认值。初始运行点为:

$U_G = 1.1\text{ pu}$ ,  $P_G = 0.81\text{ pu}$ ,  $Q_G = 0.4\text{ pu}$ ;  
 $U_F = 1.0\text{ pu}$ ,  $P_F = 0\text{ pu}$ ,  $Q_F = 0\text{ pu}$ 。在 12 s 时在中间母线上发生了一次三相接地短路故障, 经过 130 ms 后故障消除。图中的横坐标均为时间, 单位是秒, 纵坐标除发电机功角外均为标么值。

表 2 系统参数

Tab.2 The system parameter

同步发电机 (基准功率: 160 MVA)		
$T_f = 3.3\text{ s}$	$X_d = 1.014\text{ p.u.}$	$X_d' = 0.314\text{ p.u.}$
$X_d'' = 0.28\text{ p.u.}$	$X_q = 0.77\text{ p.u.}$	$X_q'' = 0.375\text{ p.u.}$
$T_{d0}' = 6.55\text{ s}$	$T_d'' = 0.039\text{ s}$	$T_q'' = 0.071\text{ s}$
FPC (基准功率: 70 MVA)		
$T_f = 3.4\text{ s}$	$R_r = 0.0013\text{ p.u.}$	$R_s = 0.0013\text{ p.u.}$
$X_s = 2.9\text{ p.u.}$	$X_r = 2.9\text{ p.u.}$	$X_m = 2.6\text{ p.u.}$
线路和变压器 (基准功率: 160 MVA)		
$X_1 = 0.33\text{ p.u.}$	$X_2 = 0.24\text{ p.u.}$	$X_3 = 0.52\text{ p.u.}$

图 20 给出了部分仿真结果。

仿真结果表明, FPC 提供的暂态有功功率补偿能和电压支撑的能力使原本在故障后要失稳的系统保持稳定, 系统振荡不超过 5 s, 振荡幅度也得到很好的抑制。从图 20(a) 可以看出, 尽管 FPC 的转动惯量只有同步发电机的 45% (见表 1), 但在整个稳定控制过程中, 其转速的变化并不大。仿真研究发现, 如果 FPC 的额定功率减小, 系统的振荡时间会加长, 发电机功角的第一摆振荡幅度也要加大。因此可以认为, 用于电力系统稳定控制的飞轮储能系统, 其储能容量并无特别高的要求, 而电机的功率容量对稳定控制性能有明显和直接的影响。当然, 在技术经济条件允许的情况下, 增大 FPC 飞轮的转动惯量和储能容量是有利的; 尤其是对于同样的动能变化, 大转动惯量的飞轮转速变化小, 因而 FPC 的转差也小, 这对于降低变频器的容量和造价有好处。

对于上述系统, 如果 FPC 只以调相方式运行, FPC 和发电机都会出现长时间振荡, 无法维持正常运行, 系统最终仍将失去稳定, 如图 21 所示。这是因为单纯的调相控制虽然可以增加系统的同步转矩, 但不能增加系统的阻尼转矩所致。

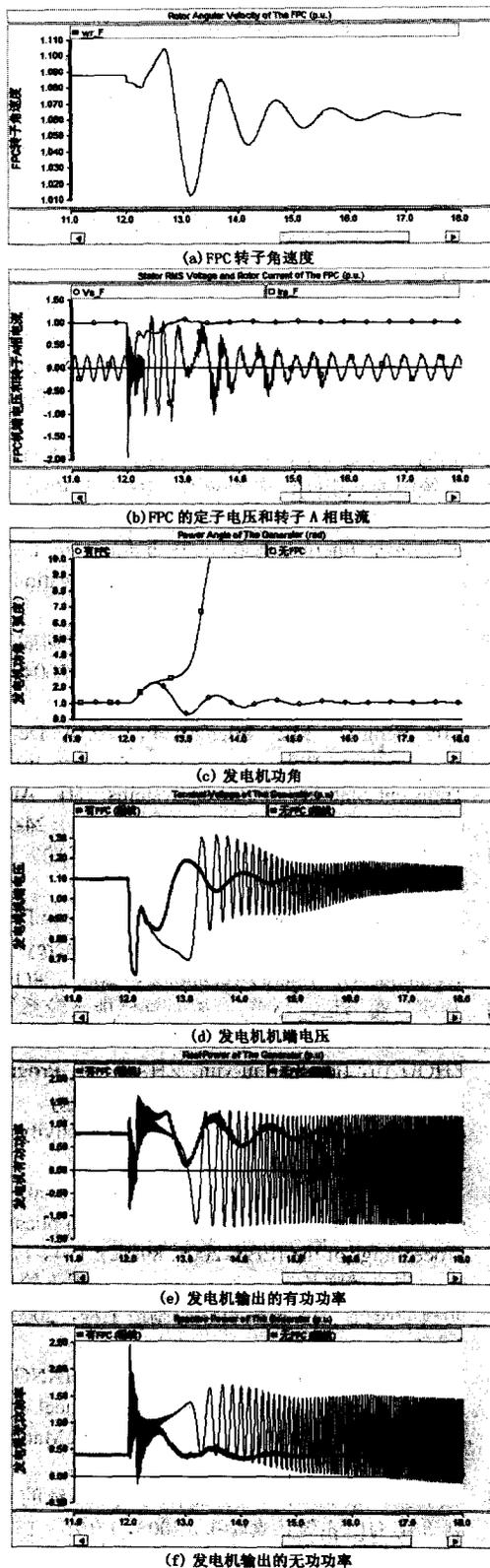


图 20 利用 FPC 控制电力系统稳定

Fig.20 Power system stabilization by FPC

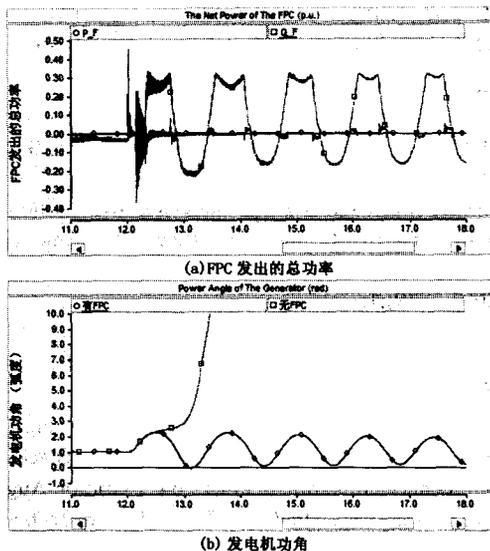


图 21 FPC 以调相机方式运行

Fig.21 The FPC operates as a condenser

由于 FPC 的工作原理是直接平衡系统中出现的动态不平衡功率, 因此就控制器来说, 不像传统 PSS 那样需要考虑对受控对象相位滞后的补偿问题。控制器的设计仅需要考虑采样周期的延时以及控制器本身的延时, 而这些不依赖于受控对象。因此, 可以预计 FPC 将具有非常好的鲁棒性。这也是将 FPC 用于电力系统稳定控制的又一突出优点。

## 6 结论

利用旋转储能的原理, 从快速补偿系统中由于故障产生的动态不平衡功率的观点出发, 提出了一种新型电力系统稳定控制装置——多功能柔性功率调节器。它由一台具有很大转动惯量和采用交流励磁的变速恒频双馈储能电机、一台双 PWM 变频器的交流励磁电源、以及一套微机励磁控制系统组成。作为一种新型的 FACTS 装置, 该控制装置通过改变转子的交流励磁电压的频率和幅值, 可以实现对 FPC 双馈交流励磁电机转子旋转速度的快速控制, 完成其对电网动态有功和无功功率的快速调节, 有效提高电力系统的稳定性。此外, 该装置还具有技术成熟、使用方便、可在系统中灵活配置等优点, 这为增强电力系统运行的稳定性提供了一种新的思路和方法。直接对动态不平衡功率进行补偿的原理使这种稳定控制装置的参数调整非常容易, 且稳定控制装置的鲁棒性非常高。本文简要阐述了柔性功率调节器的构成实现和工作原理, 分析了在

不同运行方式下装置与系统的功率交换情况。同时用数值仿真结果证明了所提出方法的有效性。

### 参考文献

- [1] 周孝信, 郑健超, 沈国荣, 等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训[J]. 电网技术, 2003, 27(9):1. ZHOU Xiao-xin, ZHENG Jian-chao, SHEN Guo-rong, et al. Lessons from the large-area Blackout in American and Canadian Power System[J]. Power System Technology, 2003, 27(9):1.
- [2] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8. 14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10):8-11. YIN Yong-hua, GUO Jian-bo, ZHAO Jian-jun, et al. Preliminary Analysis of Large Scale Blackout in Interconnected North America Power Grid on August 14 and Lessons to be Drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [3] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6. HU Xue-hao. Rethinking and Enlightenment of Large Scope Blackout in Interconnected North America Power Grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.
- [4] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6. HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Power System Security and Its Prevention [J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [5] 赵希正. 强化电网安全 保障可靠供电——美加“8. 14”停电事件给我们的启示[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1-7. ZHAO Xi-zheng. Strengthen Power System Security to Ensure Reliable Delivery[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 1-7.
- [6] 刘鹏, 吴刚. 世界范围内两起典型电压崩溃事故分析[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 35-37. LIU Peng, WU Gang. Analysis of Two Typical Voltage Collapse Incidents Worldwide[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 35-37.
- [7] 何大愚. 一年以后对美加“8. 14”大停电事故的反思[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 1-5. HE Da-yu. Rethinking Over ‘8. 14’ US-canada Blackout After one Year[J]. Power System Technology, 2004, 28(21):1-5.
- [8] 曹一家, 江全元, 丁理杰. 电力系统大停电的自组织临界现象[J]. 电网技术, 2005, 29(15):1-5. CAO Yi-jia, JIANG Quan-yuan, DING Li-jie. Self-organized Criticality Phenomenon for Power System Blackouts[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 1-5.
- [9] 唐葆生. 伦敦地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5. TANG Bao-sheng. Blackout in South of London and Its Lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.
- [10] 刘永奇, 谢开. 从调度角度分析 8.14 美加大停电[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 10-15, 45. LIU Yong-qi, XIE Kai. Analysis on Blackout of Interconnected North America Power Grid Occurred on Aug. 14, 2003 from the Viewpoint of Power system dispatching[J]. Power System Technology, 28(8): 10-15, 45.
- [11] 闵勇, 李函, 林姿峰. 基于绝对动能增量的扩展 0-1 规划在线准实时决策算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 5-9. MIN Yong, LI Han, LIN Zi-feng. Extended 0-1 Programming On-line Quasi Real-time Decision-making Algorithm Based on the Absolute Kinetic Energy Increment[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 5-9.
- [12] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用[J]. 电气应用, 2005, 24(4): 1-8. CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu, SUN Hai-shun. Application of Power Energy Storage Techniques in the Modern Power System[J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(4): 1-8.
- [13] 刘锋, 梅生伟, 夏德明, 等. 基于超导储能的暂态稳定控制器设计 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 24-29. LIU Feng, MEI Sheng-wei, XIA De-ming, et al. Nonlinear Robust Control of Smes to Improve the Transient Stability of Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 24-29.
- [14] 刘怀喜, 马润香, 张恒. 飞轮蓄能技术的发展与应用[J]. 能源技术, 2003, 24(1), 11-13. LIU Huai-xi, MA Run-xiang, ZHANG Heng. Progression and Applications of Flywheel Energy Storage Technique[J]. Energy Technology, 2003, 24(1): 11-13.
- [15] 周宇, 蒋书运, 赵雷. 磁悬浮储能飞轮系统研究进展[J]. 低温与超导, 2003, 31(1): 42-45. ZHOU Yu, JIANG Shu-yun, ZHAO Lei. Progression of Research on Flywheel Energy Storage System[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2003, 31(1): 42-45.
- [16] Ribeiro P F, Johnson B K, Crow M L, et al. Energy storage systems for advanced power applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(12): 1744-1756
- [17] 张亚崇, 孙国基, 张亚军. 电力储存用飞轮系统的控制模型研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2002, 31(4): 23-25. ZHANG Ya-chong, SUN Guo-ji, ZHANG Ya-jun. Research on Control Model of Fly Wheel System of Energy Storage[J]. Machinery Design and Manufacturing Engineering, 2002, 31(4): 23-25.
- [18] 张亚崇, 张亚军. 电力储存用飞轮系统的零消耗控制研究 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15(9): 1316-1318. ZHANG Ya-chong, ZHANG Ya-jun. Research on Zero Power Control of Energy Storage Flywheel System[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(9): 1316-1318.

(下转第 12 页 continued on page 12)

保护的整定工作,其功能完全符合发电机内部故障主保护整定工作的需要。

### 参考文献

- [1] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统的分析[M].北京:清华大学出版社,1993.  
GAO Jing-de, WANG Xiang-heng, LI Fa-hai. Analysis of AC Electrical Machines and Their System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [2] 王为国,尹项根,刘世明,等.故障发电机定子绕组主电感系数的简化计算[J].中国电机工程学报,2000,20(5).  
WANG Wei-guo, YIN Xiang-gen, LIU Shi-ming. A Simplified Method for the Calculation of Fault Generator Stator Winding's Main Inductance[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5).
- [3] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用[M].北京:中国电力出版社,1996.  
WANG Wei-jian. The Relay Protection Theory And Application of the Electric Main Equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [4] 张龙照,王祥珩,高景德.大型水轮发电机定子绕组内部故障计算的简化方法[J].电工技术学报,1991,6(2):1-5.  
ZHANG Long-zhao, WANG Xiang-heng, GAO Jing-de. Simplification in the Analysis of the Faults Inside the Stator Windings of Large Hydro Generators[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 1991, 6(2): 1-5.
- [5] 萨师焯,王珊.数据库系统概[M].北京:高等教育出版社,1991.  
SA Shi-xuan, WANG Shan. Database System Conspectus[M]. Beijing: Higher Education Press, 1991.
- (上接第8页 continued from page 8)
- [19] 张建成,黄立培,陈志业.飞轮储能系统及其运行控制技术[J].中国电机工程学报,2003,23(3):108-111.  
ZHANG Jian-cheng, HUANG Li-pei, CHEN Zhi-ye. Reserch on Flywheel Energy Storage System and Its Controlling Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 108-111.
- [20] 贾要勤,曹秉刚.基于DSP微处理器的飞轮充放电控制系统研究[J].电力电子技术,2004,38(3):58-60.  
JIA Yao-qin, CAO Bing-gang. DSP Micro-controller Based Control System of Flywheel Charge and Discharge[J]. Power Electronics Technologies, 2004, 38(3): 58-60.
- [21] 廖勇,杨顺昌.交流励磁发电机运行及控制原理[J].电工技术学报,1997,12(10):21-25.  
LIAO Yong, YANG Shun-chang. Principles of Operation and Control for Alternating Current Excitation Generators[J]. Journal of Electrotechnics, 1997, 12(10): 21-25.
- [22] 刘其辉,贺益康,卞松江.变速恒频风力发电机空载并网控制[J].中国电机工程学报,2004,24(3):6-11.  
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, BIAN Song-jiang. Study on the No-load Cutting-in Control of the Variable-speed Constant-frequency Wind-power Generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [23] 李辉,杨顺昌.可调速双馈水轮发电机组控制系统的稳定性分析[J].中国电机工程学报,2004,24(6):152-156.  
LI Hui, YANG Shun-chang. Stability Analysis of Control System of Adjustable Speed Hydroelectric Generating Units with Doubly Fed Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 152-156.
- [24] Urbanek J, Piwko R J, Larsen E V, et al. Thyristor Controlled Series Compensation Prototype Installation at Slatt 500kV Substation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1460-1469.
- [25] Akagi H, Sato H. Control and Performance of a Doubly-fed Induction Machine Intended for a Flywheel Energy Storage System[J]. IEEE Trans on Power Elect, 2005, 17(1): 109-116.

收稿日期:2006-09-10; 修回日期:2006-09-18

### 作者简介:

朱佳杰(1981-),男,硕士研究生,主要从事发电机保护的研究; E-mail:zhujiajie\_sjtu@sjtu.edu.cn

邵能灵(1972-),男,博士,副教授,主要从事电力系统继电保护,电力系统安全稳定控制,电力市场的教学和研究工作;

房鑫炎(1963-),男,博士,副教授,主要从事电力系统继电保护与自动化的研究工作。

收稿日期:2006-11-27

### 作者简介:

程时杰(1945-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用、低压电网载波通信、超导电力等;

E-mail:sjcheng@hust.edu.cn

文劲宇(1970-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、超导电力、飞轮储能等;

潘垣(1933-),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,目前主要研究方向为脉冲功率、强磁场和储能等。