

用于风电场无功补偿的 STATCOM 动态特性分析

项 真¹, 解 大¹, 龚锦霞¹, 张延迟²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240; 2. 上海电机学院电气工程系, 上海市 200240)

摘要:建立了包含风力机和异步感应发电机在内的风电机组的整体动态数学模型;以建立的数学模型为基础确立了接入无穷大系统的风电场仿真模型。给出了一种新型的基于直流侧电容电压控制和系统无功电流反馈控制的算法对静止无功补偿器(STATCOM)实行控制,以渐变、随机和阵风这 3 种风速情况为例对 STATCOM 的补偿特性进行了仿真分析,并将其补偿效果与晶闸管投切电容器(TSC)进行了比较。仿真结果表明,与 TSC 相比,STATCOM 在补偿过程中能迅速稳定地跟踪无功的变化,并且补偿时无明显的冲击电压和电流。

关键词:风力发电;模型;STATCOM;仿真;无功补偿

中图分类号: TM761; TM612

0 引言

作为一种新型无污染的可再生能源,现代风力发电产业以其较为成熟的技术、优越的经济性和巨大的市场吸引力已经成为电网电源中的一项重要组成部分^[1]。然而随着风电场容量越来越大,风电机组并网对系统造成的影响也越来越明显。国内目前的风电场大多采用感应式异步电机为主导^[2-5],此类风电场并入电网运行时需要吸收系统的无功功率。在风电场机端安装无功补偿设备则可以提供异步发电机所需的部分无功功率,减少其在电网中的流动,从而降低电网因输送无功功率造成的电能损耗,改善电网的运行条件。

随着电力电子技术的飞速发展,在固定电容器组作为一种传统的无功补偿方法逐渐显现弊端的同时,将柔性交流输电系统(FACTS)运用到风电场以提高其运行的稳定性已经成为一种必然趋势^[3]。先进的静止无功补偿器(STATCOM)作为 FACTS 控制器的重要成员之一,以其体积小、容量大、调节连续、响应速度快、经济性能好等优点也越来越受到人们的关注^[4-15]。

本文将一种新型的基于直流侧电容电压控制和系统无功电流反馈控制的 STATCOM 应用于风电场机端无功补偿中,在不同风速情况下对双机风电场的无功补偿情况进行了仿真分析,研究了 STATCOM 的动态补偿特性,并将其与晶闸管投切电容器(TSC)技术进行无功补偿的效果进行了比较。

1 仿真系统

以风电场-无穷大系统为例来进行仿真分析,该系统如图 1 所示。2 台额定容量为 600 kW 的异步风机通过电缆与 1 台变比为 0.398 kV/10.5 kV 的变压器相连,再由电缆接入无穷大系统。STATCOM 并联在风机出口处,主电路拓扑为电压源型,主回路采用三相独立桥结构,通过控制变流器中电力电子器件开关的通断动态产生所需的无功电流。

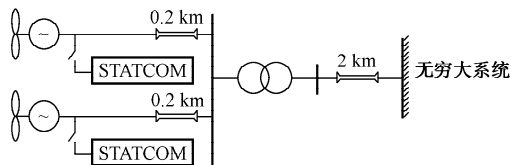


图 1 风电场与无穷大系统连接
Fig. 1 A wind farm connected with an infinite system

1.1 风速模型

现在普遍采用的风速模型是 4 种风速的叠加^[12],其叠加公式为:

$$V = V_{WB} + V_{WG} + V_{WR} + V_{WN} \quad (1)$$

式中: V_{WB} 为基本风风速,可以由风电场测风数据获得的威布尔分布参数近似确定; V_{WG} 为阵风风速,用以描述风速突然变化的特性; V_{WR} 为渐变风风速,表示风速的渐变特性; V_{WN} 为随机噪声风风速,一般用随机噪声风分量来表示。

1.2 风力机模型

根据实测数据,由异步电动机转速 ω 和风速 V 共同确定电机的机械转矩 T_m 。在各种风速情况下测得若干组对应的 ω 和 T_m 值,将这些数据拟合成

若干条不同的曲线,使得在不同风况下唯一的 ω 可以对应唯一的 T_m 。将风速作为选择的条件,找出特定风速下与特定 ω 相对应的 T_m 值。对于相同的 ω 值,不同风况下的 T_m 值会有所不同,对于风速较大的情况,同样的 ω 值对应的 T_m 值也会较大。 ω - T_m 拟合曲线见附录 A 图 A1。

1.3 异步发电机模型

风电机模型采用异步发电机,其等值电路如图 2 所示。

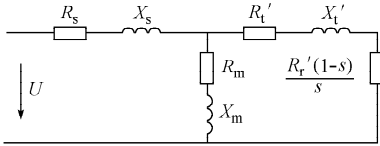


图 2 异步发电机等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of asynchronous machine

在机电暂态下,以定子量表示的异步发电机三阶数学模型参见文献[16]。

1.4 其他仿真元件

除了风电机组以外,其他仿真元件还包括总容量为 175 kvar 的等容分组 TSC,直流侧电容为 20 000 μ F 的 STATCOM 以及 0.398 kV/10.5 kV 的变压器等。

2 STATCOM 的补偿原理及算法

2.1 基本原理

本文运用的 STATCOM 控制方法从瞬时有功和无功能量在系统中传递的角度出发,以保持直流侧电容电压稳定和发出的电流为风机的无功电流为目标,直接对风机的输出电流进行控制,动态地补偿其运行过程中所需的无功电流。

算法的整体结构可以表示为图 3,即计算目标电流 i_c^* 中的有功分量和无功分量,以 i_c^* 为目标电流与采集到的 STATCOM 输出电流 i_c 进行滞环脉宽调制(PWM)比较。

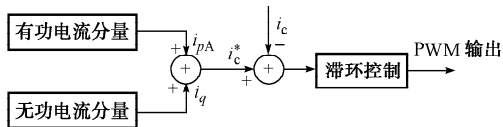


图 3 控制算法结构

Fig. 3 Structure of control strategy

该控制策略的关键部分在于直流侧电压控制和对目标电流 i_c^* 的求取,主要在于求出补偿的无功电流 i_q 和装置需补偿的有功电流 i_{pA} ,有功电流又分为损耗电流和动态时直流侧电容电压充放电电流 2 个部分。通过对电容电压的周期变化进行比例积

分(PI)变换,可得到需要补偿的有功电流,同时保持直流侧电压稳定。负荷无功电流的计算方法是直接提取负荷电流中的无功分量。采用单周期采样环节保证输出有功及无功电流无畸变^[17-18]。

由于损耗电流的存在,电容电压值会使直流侧电压不断下降;并且在系统动态过程时,功率平衡会短时被破坏,电容电压也会发生波动。直流电容电压周期值的变化反映了变流器两侧有功功率的传递。在该算法中对电容电压进行周期采样和比较,找出电容电压的周期变化值,计算等效的损耗有功电流,控制有功的传递情况,保证直流侧电压稳定在某一值附近波动。其控制框图见附录 A 图 A2。

2.2 损耗电流的计算

损耗电流等效幅值 I_{pA} 的计算公式如下:

$$I_{pA} = \frac{CU_{dc}\Delta U_{dc} + \frac{C\Delta U_{dc}^2}{2}}{\frac{T}{2}U_{sM}} = \frac{2U_{dc}C}{TU_{sM}}\Delta U_{dc} + \frac{C}{TU_{sM}}\Delta U_{dc}^2 \quad (2)$$

式中: U_{dc} 为直流侧电容电压; U_{sM} 为系统电压的幅值; C 为直流侧电容; ΔU_{dc} 为直流侧电压的变化; T 为工频周期 20 ms。

通过式(2)可得变流器直流侧电容电压上的变化可以反映损耗电流的大小。通过 PI 环节将采样得到的电压比较值修正后,可以得到损耗电流的幅值大小。损耗电流与系统电压同相位,两者相乘就可以得到系统的损耗电流。

2.3 无功电流的计算

利用三角函数系的正交性,将系统电压 $u_s(t)$ 采样后延时 1/4 个周期,得到其相应的余弦值 $u_s'(t) = U_{sM}\cos \omega t$,与采样得到的负荷电流 i_L 相乘,在一个周期积分平均以提取基波无功电流分量。

无功计算部分包含了 $\sin \theta$ 信息(θ 为基波电流超前系统电压的电角度),它表明了系统中负荷电流含有的是感性分量还是容性无功分量及无功分量含量大小,将无功计算结果直接作用于无功补偿设备发出的电流信号,因此,系统电流为感性或容性时均可以得到有效的补偿。

3 仿真结果与分析

3.1 不同风速下的无功补偿特性

假设最初时刻风速为 8 m/s,在 $t=2$ s 时刻出现渐变风。渐变风的上升时间为 2 s,之后保持在峰值处,渐变风风速幅值为 9 m/s。同时,在 1.7 s 时投入 STATCOM 对系统进行无功补偿。具体风速曲线、补偿前后风电机组输出无功曲线以及风电场

母线电压、系统电流曲线如图 4 所示。

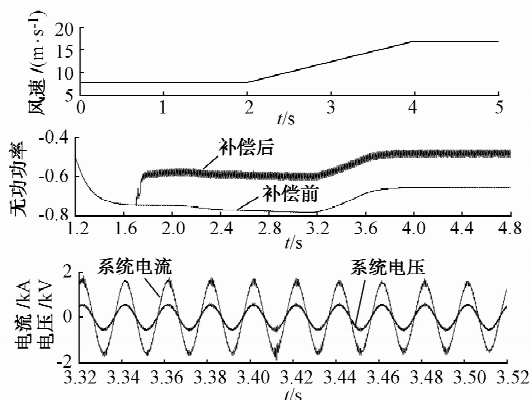


图 4 渐变风速下的系统电压、电流及无功

Fig. 4 System voltage, current and reactive power during wind speed ramp

其他条件不变,仅改变风速曲线的特征,在干扰随机风速和阵风风速情况下,STATCOM 仍可以迅速补偿风力发电机所需的无功,补偿后电压与电流几乎完全同相,并且在风速变化过程中也能保持稳定,不受影响。具体仿真结果见附录 B 图 B3。

3.2 STATCOM 与 TSC 无功补偿特性比较

在渐变风风速条件下进行 STATCOM 与 TSC 无功补偿特性比较:采用等容量分组的 TSC,在 1 s 之内完成所有电容器的分级投入,STATCOM 则在 $t=1.7$ s 时投入。现观察两者在投入瞬间对系统电流及发电机母线电压造成的冲击。具体电流及电压波形如图 5 所示。

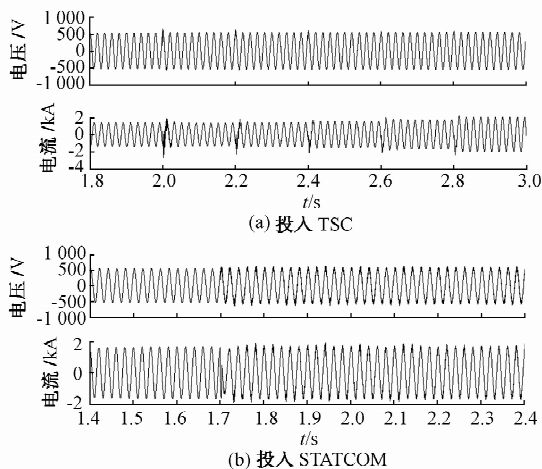


图 5 TSC 与 STATCOM 投入时的母线电压及系统电流

Fig. 5 System voltage and current with TSC & STATCOM

由图 5 可见,TSC 投入时,系统电压和电流的增加随着 5 组电容器的分别投入,波形明显呈阶梯形式,同时会出现多次明显涌流及过电压现象。本

仿真中,TSC 采用电压过零投入方式,最大涌流值与过电压值分别为约 2 400 A 和约 659 V,仍然超出稳定值很多。由于采用软并网,STATCOM 则不存在这一渐变过程,其冲击电压及电流变化很小,电压及电流几乎在无冲击状态下即达到稳定值,由于 IGBT 开关频率的作用使得波形有些许毛刺。

风速变化过程中 STATCOM 部分变量的波形图见附录 B。

4 结论

风电并网需要向系统吸收无功功率这一特性使得研究风机机端并联补偿形式成为一个重要课题,通过对 STATCOM 无功补偿特性和控制算法的研究,本文建立了无穷大母线系统上的双机风电场模型,在不同风速情况下对该系统进行了仿真分析,并与 TSC 的无功补偿效果进行了比较,可得到以下结论:

1) STATCOM 补偿效果显著且稳定,补偿后系统电压与电流几乎同相且不会随风速的波动发生变化,动态补偿效果好。

2) STATCOM 较 TSC 在投入瞬间过渡平稳,无明显冲击电压与电流突变。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 王承煦,张源. 风力发电. 北京:中国电力出版社,2003.
- [2] 许洪华,郭金东,郭春良. 世界风电技术发展趋势和我国未来风电发展探讨. 中国风能,2005(2):40-42.
XU Honghua, GUO Jindong, E Chunliang. The research on the development of worldwide wind power techniques and its future development in our country. Chinese Wind Energy, 2005(2): 40-42.
- [3] 胡家兵,贺益康,郭晓明,等. 不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制. 电力系统自动化,2007,30(14):47-56.
HU Jiabing, HE Yikang, GUO Xiaoming, et al. Modeling and control of the DFIG based wind-power generation system under unbalanced grid voltage conditions. Automation of Electric Power Systems, 2007, 30(14): 47-56.
- [4] 迟永宁,关宏亮,王伟胜,等. SVC 与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性. 电力系统自动化,2007,30(3):95-100,104.
CHI Yongning, GUAN Hongliang, WANG Weisheng, et al. Enhancement of transient voltage stability of induction generator based wind farm by SVC and pitch control. Automation of Electric Power Systems, 2007, 30(3): 95-100, 104.
- [5] 常勇,徐政,郑玉平. 大型风电场接入系统方式的仿真比较. 电力系统自动化,2007,30(14):70-75.
CHANG Yong, XU Zheng, ZHENG Yuping. A Comparison of the integration types of large wind farm. Automation of Electric Power Systems, 2007, 30(14): 70-75.

- [6] ROSSM K. Understanding grid issues at wind farms and solutions using voltage source converter FACTS technology // Power Engineering Society General Meeting; Vol 3, July 13-17, 2003, Toionto, Canada; 1822-1828.
- [7] ZANG P M, DING Q F. The development of FACTS and its control//Proceeding of 4th International Conference in Power System Control, Operation and Management, November 11-14, 1997, Hong Kong, China. Stevenage, UK; IEE, 1997; 49-53.
- [8] HANDSON D J, WOODHOUSE M L, HORWILL C, et al. STATCOM, a new era of reactive compensation. Power Engineering Journal, 2002, 16(3); 151-160.
- [9] HINGORANT N G, GYUGYI L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York, NY, USA; IEEE Press, 2000; 197-205.
- [10] EL-MOURSE M S, SHARAF A M. Novel controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for voltage regulation and reactive power compensation. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4); 1985-1997.
- [11] SOTO D, GREEN T C. A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controller. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(5); 1072-1080.
- [12] 宋珊,陈建业.基于晶闸管的 STATCOM 原理和实现.电力系统自动化,2006,30(9):49-54.
SONG Shan, CHEN Jianye. Theory and prototype verification of thyristor based STATCOM. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 49-54.
- [13] 张洪涛,宋强,刘钟淇,等.±50 Mvar 链式 STATCOM 的实时数字仿真.电力系统自动化,2006,29(17):19-23.
ZHANG Hongtao, SONG Qiang, LIU Zhongqi, et al. Real-time digital simulation of a ±50 Mvar cascaded STATCOM. Automation of Electric Power Systems, 2006, 29(17): 19-23.
- [14] 刘丽霞,衣书伟,姚衍民.静止无功补偿器在电压稳定中的分析研究.华东电力,2006(8):15-18.
LIU Lixia, YI Shuwei, YAO Yanmin. Functions of SVC and STATCOM for voltage stability. East China Electric Power, 2006(8): 15-18.
- [15] 冯煜程,陈陈.静止同步补偿器与传统静止无功补偿器的比较与分析.华东电力,2005,33(9):16-19.
FENG Yucheng, CHEN Chen. Comparative analysis of static compensators and conventional static VAR compensators. East China Electric Power, 2005, 33(9): 16-19.
- [16] 孙建锋.风电场建模和仿真研究[D].北京:清华大学,2004.
- [17] 吴非,解大,张延迟.新型电力有源滤波器补偿特性研究.电力自动化设备,2007,27(1):36-38.
WU Fei, XIE Da, ZHANG Yanchi. The study of compensative characteristics of a novel active power filter. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1): 36-38.
- [18] 解大,张延迟,吴非,等.并联型电力有源滤波器的直流侧电压控制和补偿电流反馈控制.电网技术,2006,30(3):18-21.
XIE Da, ZHANG Yanchi, WU Fei, et al. A new-style shunt active power filter based on DC capacitor voltage control and compensation current feedback control. Power System Technology, 2006, 30(3): 18-21.

项 真(1982—),女,硕士研究生,主要研究方向:风力发电与电力系统分析。

解 大(1969—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真。E-mail: xieda@sju.edu.cn

龚锦霞(1984—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真。

Dynamic Characteristics Analysis of STATCOM for Reactive Compensation in Wind Farm

XIANG Zhen¹, XIE Da¹, GONG Jinxia¹, ZHANG Yanchi²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper establishes a dynamic model for wind turbine-generator unit, including the wind-turbine and asynchronous induction generator. Based on the proposed dynamic model, a model of wind farm connected with an infinite system is constructed. Based on the DC voltage control as well as the feedback control of reactive current, a new control algorithm is presented for STATCOM. Considering three cases, i.e., the wind speed ramp, the wind gust and the wind disturbance, the numerical simulations on compensation characteristics of STATCOM are studied. The compensation effects between TCSC and STATCOM are compared. The simulation results illustrate that STATCOM can track the changing of reactive power quickly and stably in the procedure of reactive power compensation comparing to TCSC, and there are no serious inrush currents or over-voltages.

Key words: wind generation; model; static synchronous compensator (STATCOM); simulation; reactive compensation

附录 A ω - T_m 拟合曲线和直流电压控制框图

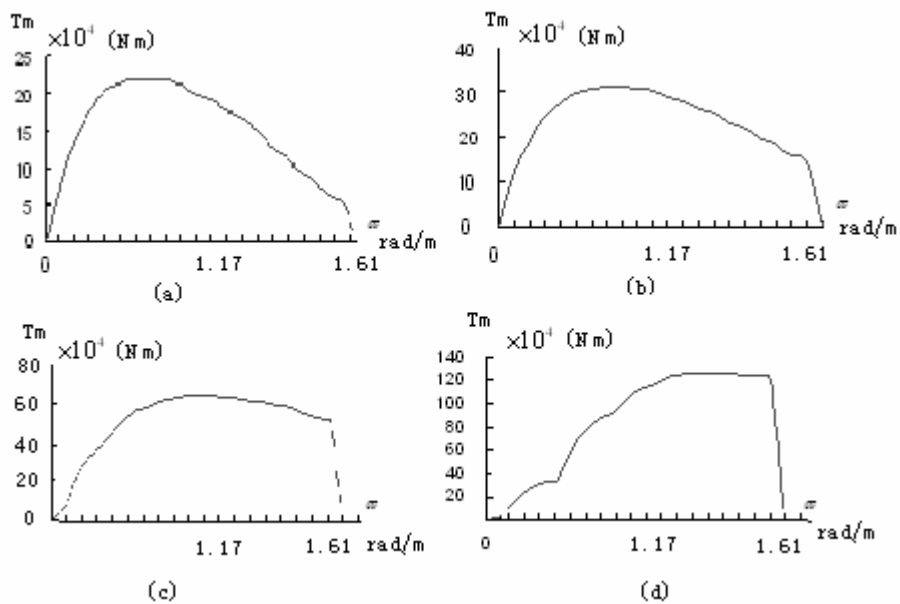


图 A1 ω - T_m 拟合曲线
Fig.A1 ω - T_m curve

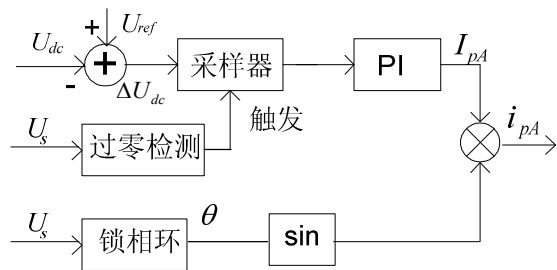
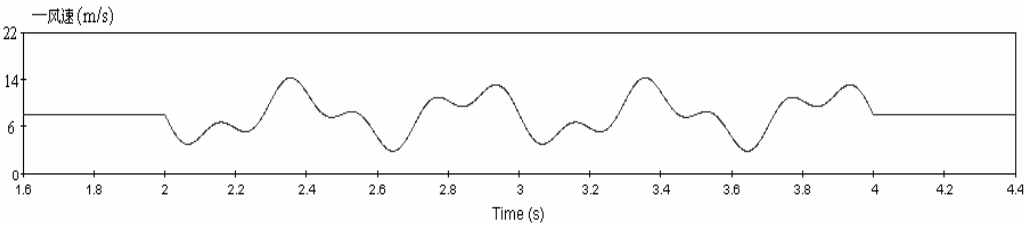


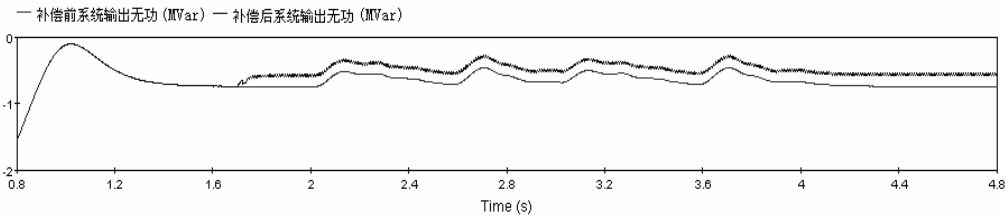
图 A2 直流侧电压控制
Fig.A2 The control of DC capacitor voltage

附录 B 干扰随机风和阵风情况下的仿真结果

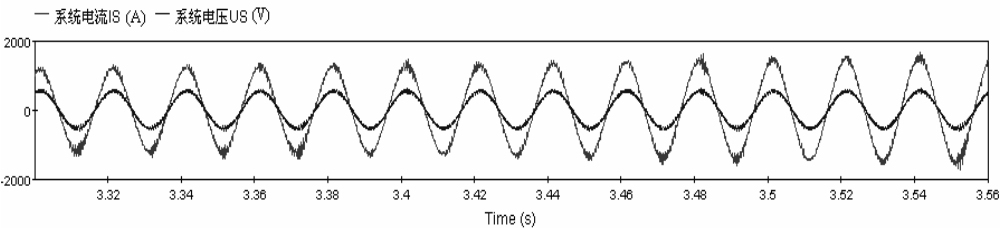
用干扰随机风，起始时间为 2s，持续 2s，其仿真波形见图 B1。



(a) 干扰随机风速曲线



(b) 补偿前后风电机组输出无功功率

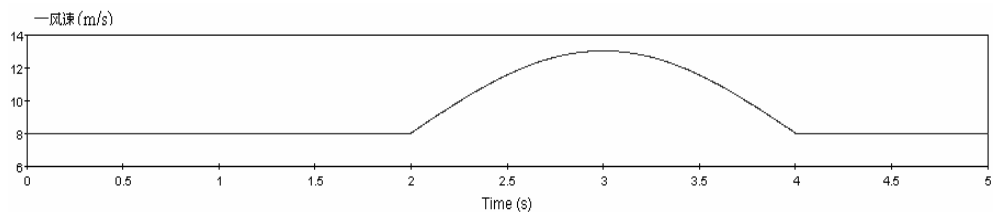


(c) 系统电压和电流曲线

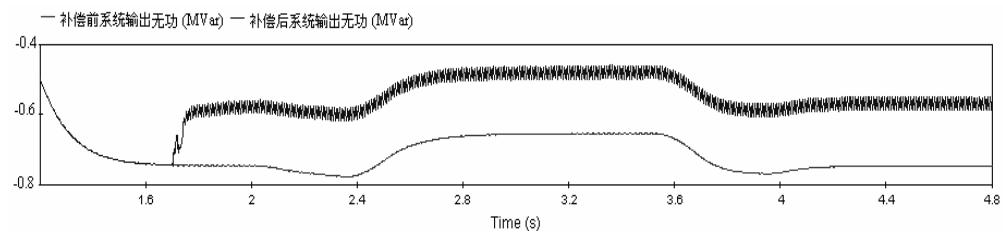
图 B1 随机干扰风速下的系统电压、电流及无功

Fig.B1 System voltage, current and reactive power during wind disturbance

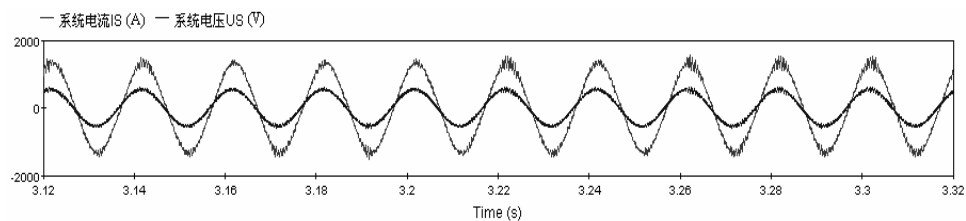
仅改变风速曲线的特征采用阵风，起始时间为 2s，持续 2s，阵风风速幅值为 5m/s，具体仿真结果如图 B2 所示。



(a) 阵风风速曲线



(b) 补偿前后风电机组输出无功功率



(c) 系统电压和电流曲线

图 B2 阵风风速下的系统电压、电流及无功

Fig.B2 System voltage, current and reactive power during wind gust

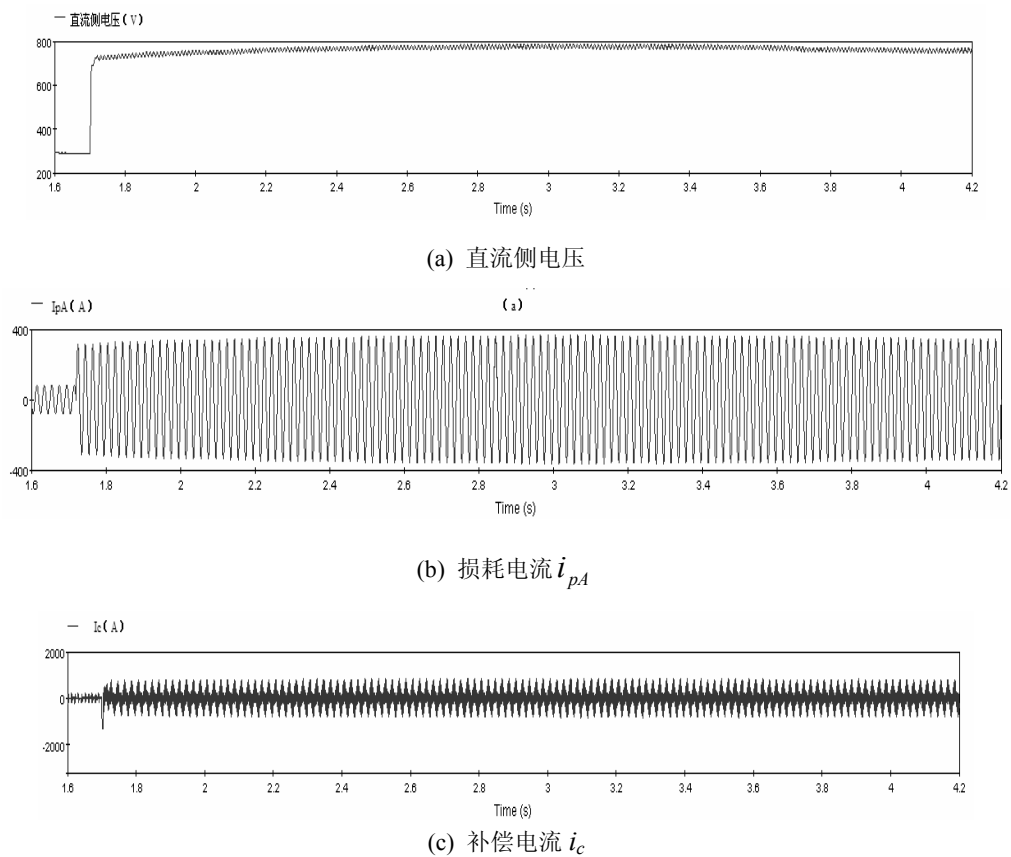


图 B3 渐变风速情况下 STATCOM 投入时部分变量曲线

Fig.B3 The curves of some variables in STATCOM during wind speed ramp