

基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制

李 霄, 胡长生, 刘昌金, 徐德鸿
(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 随着风电装机容量的不断提高, 风电输出功率的波动性给电网带来的不利影响越来越得到重视。文中介绍一种基于超级电容储能的风电场功率调节系统, 利用超级电容器组作为储能元件, 平抑风电场有功、无功功率波动, 维持风电场输出端电压, 降低风电场对电网电能质量的影响。基于功率调节系统的结构特点和工作原理, 提出了一种网级控制、超级电容能量管理和变流器控制相结合的控制策略, 并建立了变流器的动态小信号模型, 进行了环路控制器设计。利用仿真软件 PSCAD/ EM TDC 对系统的控制策略进行了仿真分析, 仿真结果验证了该装置具有良好的运行性能。

关键词: 风力发电; 超级电容储能; 电能质量; 小信号模型; 控制设计

中图分类号: TM614; TM46; TM743

0 引言

风力发电是当前发展最快的可再生能源发电技术^[1]。但是, 风能是一种随机变化的能源, 风速变化会导致风电机组输出功率的波动, 对电网的电能质量产生影响^[2]。因此, 研究并网风电场的输出功率调节成为风力发电技术中的重要问题。

目前风电有功功率波动多采用直接调节风力涡轮机运行状态的方法来平滑其输出功率^[3], 但该方法的功率调节能力有限; 无功功率波动通常采用并联静止无功补偿装置进行无功调节^[4], 但无功补偿装置无法平抑有功功率波动。附加储能设备既可以调节无功功率、稳定风电场母线电压^[5-6], 又能在较宽范围内调节有功功率, 是当前研究的一个研究热点。风力发电研究表明位于 0.01 Hz ~ 1 Hz 的波动功率对电网电能质量的影响最大^[7-8], 平抑该频段风电波动采用较短时间的能量存储就可以达到目的^[9], 因此能够实现短时能量存储的较小容量的储能设备对风力发电具有更高的实用价值。以往抑制风电功率波动多考虑采用蓄电池、飞轮或超导等储能技术^[10-13], 超级电容储能技术关注较少。超级电容器具有功率密度极高、循环寿命长、环境无污染和免维护等优点, 随着制造技术的发展, 超级电容器的能量密度有了很大提高, 在一些短时电力储能场合已经进入了商业化应用阶段^[14-15]。利用超级电容器存储能量, 平抑风电场输出功率重要频段的风电波动具

有良好的应用前景。

本文介绍了一种基于超级电容储能的风电场功率调节系统, 针对系统结构特点和工作原理提出了网级控制、超级电容能量管理和变流器控制相结合的控制策略, 仿真结果表明该系统在平抑了 0.01 Hz ~ 1 Hz 风电场有功功率波动的同时, 通过无功功率调节稳定了风电场母线电压, 具有良好的运行性能。

1 系统结构和运行原理

图 1 为带有调节装置的并网风力发电系统结构示意图。公共连接点 (PCC) 处接有本地负荷, 超级电容器组 (SC) 作为直流侧的储能元件, 功率调节系统 (PCS) 采用四象限电压型变流器 (VSC) 级联双向直流变换器 (Bi-DC/DC) 结构, 最终通过升压变压器并联于风电场输出端母线。

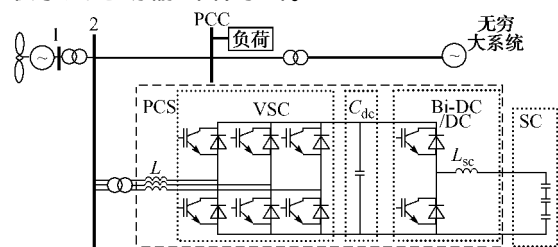


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the system

该装置有以下 2 种工作模式:

1) 风电场功率调节模式: 当检测到设定频段的有功功率波动时, 装置快速吸收波动的有功、无功功率, 平滑风电场功率输出, 维持风电场输出端母线电

压稳定。

2) 充放电模式:一方面在装置最初安装或检修后重启时将超级电容器组充电到预先设定的电压值 V_{sc_ref} ,在装置故障或检修时将超级电容器组储存的电能释放;另一方面当没有检测到设定频段内的有功功率波动时,通过对超级电容器缓慢的充放电维持超级电容器电压 V_{sc_ref} 。为保证超级电容器组有相同的充放电空间,根据式(1)来进行 V_{sc_ref} 的设定:

$$\frac{1}{2} C_{sc} V_{sc_max}^2 - \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc_ref}^2 = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc_ref}^2 - \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc_min}^2 \quad (1)$$

式中: C_{sc} 为超级电容器组的电容量; V_{sc_max} 为超级电容器组允许的最高充电电压; V_{sc_min} 为超级电容器组允许的最低放电电压。

2 控制系统

如图 2 所示,控制系统由图中虚线框内的 3 部分组成:网级控制、超级电容能量管理和变流器控制。网级控制根据风电场有功功率和输出端母线电压波动情况给出装置的有功、无功功率指令。超级电容器具有电压随充放电时间改变的充放电特性,因此通过超级电容能量管理,一方面在功率调节模式中避免过欠电压发生,另一方面在充放电模式控制充放电功率。变流器通过 VSC 的有功、无功功率解耦控制,快速跟踪网级控制和超级电容能量管理给出的有功、无功功率指令。系统输出功率变化会导致直流母线电容器上的电压波动,故通过 Bi-DC/DC 对超级电容器快速充放电来恢复并维持直流母线电压。

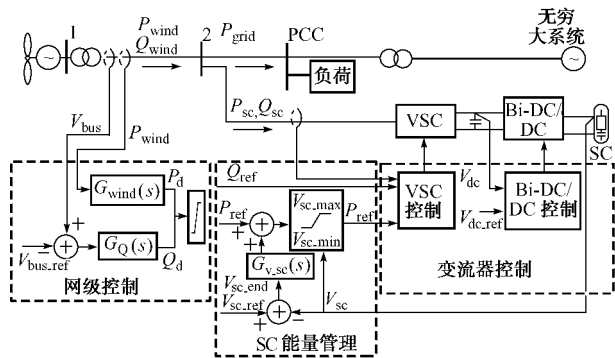


图 2 控制系统结构
Fig. 2 Control system structure

2.1 网级控制

网级控制为了滤除风力涡轮机输出功率中 0.01 Hz ~ 1 Hz 频段的波动成分,1 Hz 以上成分主要被风力涡轮机的惯性所吸收^[10-11],有功功率控制

需要滤除 P_{wind} 中 0.01 Hz 以上波动成分,故将 $G_{wind}(s)$ 设计为一阶巴特沃斯高通滤波器^[7,13]:

$$G_{wind}(s) = \frac{s}{1+s} \quad (2)$$

式中: τ 为滤波器的时间常数,穿越频率设置为 0.01 Hz 时 $\tau = 16$ s。

如不考虑容量限制且变流器控制带宽远高于 1 Hz,使变流器在 1 Hz 以上有良好响应,则

$$P_{sc} = P_{ref}^* = P_{wind} \frac{16s}{1+16s} \quad (3)$$

P_{wind} 中 0.01 Hz ~ 1 Hz 频段的波动成分由功率调节装置来吸收。

由于风电场输出端母线电压对无功功率波动更为敏感,因此可以通过无功功率的调节来维持母线电压^[9]。如图 2 所示, V_{bus_ref} 为母线电压设定值, $G_Q(s)$ 为 PI 调解器, $G_Q(s) = k_{Qp} + \frac{k_{Qi}}{s}$, 其中 $k_{Qp} = 6$,

$k_{Qi} = 700$ 。

2.2 超级电容能量管理

超级电容能量管理通过超级电容器电压控制环和电压限制模块来实现。设计超级电容器电压环带宽远低于 0.01 Hz,那么在功率调节模式时该环路的作用可以忽略,仅通过电压限制模块来实现超级电容器电压管理。超级电容器快速提供充放电功率平抑风电波动时,其电压会随之迅速变化并可能导致过充放电的发生,过充电会严重影响超级电容器使用寿命,过放电则会导致超级电容器输出功率受限,因此由电压限制模块保证超级电容电压在允许的范围之内。 $P_{ref} > 0$ 时如图 3 中虚线所示, K_{psc} 为功率限幅系数,当 $V_{sc} < V_{sc_up}$ 时, $K_{psc} = 1$, $P_{ref}^* = P_{ref}$; 充电到 V_{sc_up} 后开始对 P_{ref} 进行降幅处理,当 $V_{sc} > V_{sc_max}$ 时, $K_{psc} = 0$, $P_{ref}^* = 0$, 保证超级电容器不会过充。 $P_{ref} < 0$ 时如图中实线所示,同理保证超级电容器不会过放。

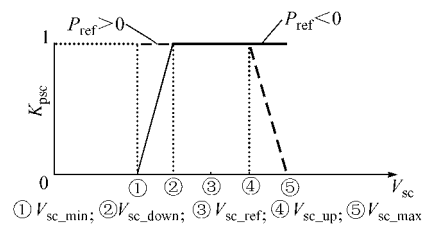


图 3 超级电容器电压限制规则
Fig. 3 Diagram of SC voltage limit rule

在充放电模式中,没有检测到设定频段的有功功率波动即 $P_{ref} = 0$,仅超级电容器电压环起作用,通过缓慢的充放电维持超级电容器电压为 V_{sc_ref} 。如图 4 所示,通过电压调节器 $G_{vsc}(s)$ 给定超级电容

器充放电功率。

图4中, $G_{v_sc}(s) = k_{sp} + k_{si}/s$, 其中 $k_{sp} = 0.447$, $k_{si} = 0.0028$, 电压环带宽为 0.002 Hz , 即 $1/5$ 的风电场有功功率滤波器穿越频率, 因此超级电容器电压环不会对风电功率调节产生影响。

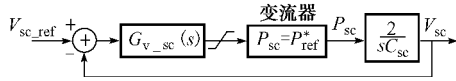


图4 超级电容器电压外环控制框图
Fig.4 Block diagram of SC voltage control

2.3 变流器控制

变流器控制系统如图5所示, 有功、无功功率控制可以通过 i_d 和 i_q 的解耦控制来实现。双向直流变换器采用双环控制策略, 电压外环控制直流母线电压保持不变, 电流内环控制超级电容器充放电电流的动态变化, 避免超级电容器充放电电流超过限制。

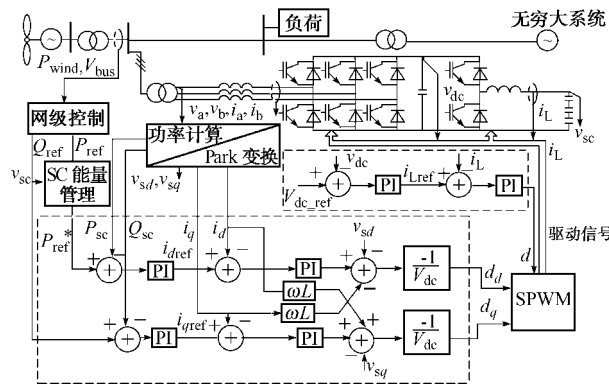
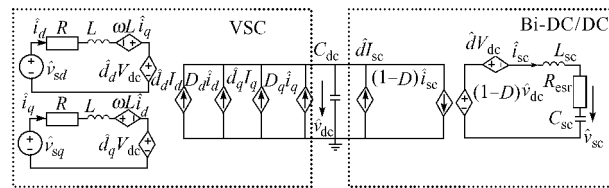


图5 变流器控制策略
Fig.5 PCS control scheme

为实现变流器功率和直流母线电压的精确控制, 本文采用状态空间平均的方法建立了变流器的数学模型, 并从控制设计的角度出发引入 Park 变换, 得到 dq 坐标系下小信号开关周期平均数学模型, 其等效电路如图6所示。



v_{sd}, v_{sq}, i_d, i_q 为电网电压和网侧电流 d 轴和 q 轴的坐标分量; ω 为系统角频率; L 为线路等效电感 (滤波电感与变压器漏感之和); R 为线路等效电阻; d_d 和 d_q 分别为 VSC 三桥臂上管开关占空比在 d, q 坐标下的分量; d 为 Bi-DC/DC 下管开关占空比

图6 PCS 小信号平均模型
Fig.6 Small-signal average model of PCS

由变流器小信号模型可以得出环路控制器设计

需要的传递函数, 变流器控制环路设计及参数详见附录 A。

3 储能单元设计

风电功率调节系统主要平抑 $0.01\text{ Hz} \sim 1\text{ Hz}$ 的风电功率波动, 因此根据风电功率最低频率波动配置储能单元的储能容量, 考虑储能单元有相同的充放电空间, 首先分析在 (V_{sc_ref}, V_{sc_max}) 充电空间内能够吸收的能量如下式所示:

$$E_{sc1} = P_{sc}(s) = \frac{s}{1+s} P_{wind}(s) \quad 2 P_{wind0.01} \quad (4)$$

式中: $P_{wind0.01}$ 为风电场 0.01 Hz 有功功率波动幅值, 在最恶劣的情况下 $P_{wind0.01}$ 为 0.5 倍的风电场容量。

在 (V_{sc_ref}, V_{sc_min}) 放电空间内能够释放的能量与充电空间内能够吸收的能量相同, 故储能单元总储能如下式所示:

$$E_{sc} = 4 P_{wind0.01} \quad (5)$$

超级电容器单体电压一般较低 (2.5 V 左右), 因此储能单元由多个超级电容器单体串并联组成以达到系统容量需求。储能单元设计要综合考虑能量和功率 2 方面需求。储能单元储存的总能量表示为:

$$E = \frac{N}{2} C_{sc_unit} (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad E_{sc} \quad (6)$$

式中: N 为超级电容器单体的个数; C_{sc_unit} 为单体电容量; V_{max} 为超级电容器耐压; V_{min} 为超级电容器允许的最低放电电压。

大电流放电情况考虑到超级电容器串联等效电阻的影响, 根据电路原理的最大功率传输定理可以得到储能单元最大放电功率为:

$$P_{max} = N \frac{V_{dc}^2}{4 R_{esr}} P_{sc} \quad (7)$$

超级电容器放电到最低电压 V_{min} 时仍能保证额定功率输出, V_{min} 需要满足下式:

$$V_{min} \geq 2 \sqrt{\frac{R_{esr} P_{sc}}{N}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)得到 N 的限制条件为:

$$N \geq \frac{2 E_{sc} + 4 P_{sc} R_{esr}}{C_{sc_unit} V_{max}^2} \quad (9)$$

4 仿真结果

用于仿真研究的风力并网发电系统结构图以及基于超级电容储能的风电场功率调节装置参数详见附录 B。风电场输出端通过并联 2.15 Mvar 的电

器组提供恒定无功对异步发电机组进行无功补偿,实现风电场单位功率因数。

假定风电场在 120 s 内的风速变化如图 7 所示,图 8 给出在此风速下的风电场有功功率和无功功率波动情况,有功功率波动的瞬时幅值达到 8 MW(0.53(标么值)),而无功功率虽然通过电容补偿器的无功补偿维持在 0,但仍存在较大波动。注入电网有功功率和调节系统吸收的有功功率如图 9 所示。

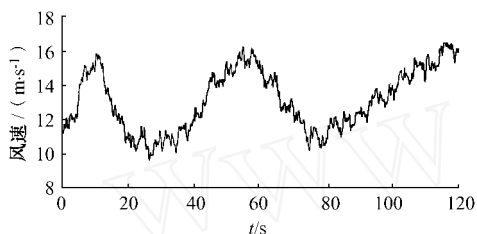


图 7 用于仿真的短时风速曲线
Fig. 7 Short-term wind speed in simulation

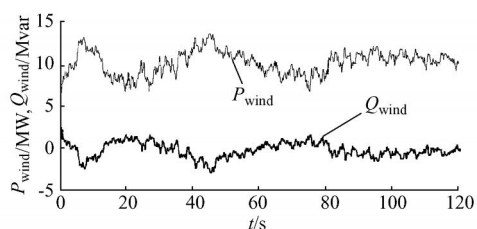


图 8 风电场有功功率和无功功率曲线
Fig. 8 Wind farm output active power and reactive power

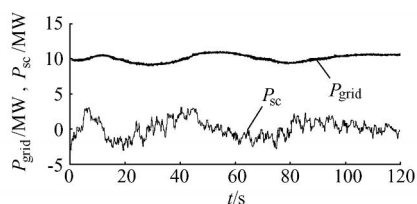


图 9 风电场注入电网有功功率和装置吸收有功功率
Fig. 9 Grid and device absorbing active power

采用功率调节装置后,风电场输入电网的有功功率波动瞬时幅值为 2 MW(0.13(标么值)),波动减小了 75%。风电场注入电网的无功功率和调节系统吸收的无功功率如图 10 所示,由调节装置吸收了风电场输出无功功率的波动成分,使注入电网的无功功率波动也明显减小。

没有调节装置时风电场输出端母线电压受到无功功率波动影响会有较大波动,如图 11(a)所示,其波动幅值接近 0.1(标么值),图 11(b)为有调节装置时风电场输出端母线电压,电压波动幅值仅 0.01(标么值)。

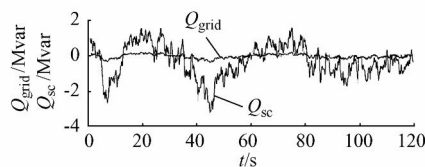


图 10 风电场注入电网无功功率和装置吸收无功功率
Fig. 10 Grid and device absorbing reactive power

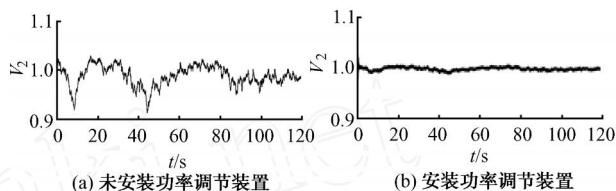


图 11 风电场输出端母线电压
Fig. 11 Wind farm terminal voltage

超级电容器电压如图 12 所示。通过能量管理其电压始终被限制在允许范围之内, $V_{sc_max} = 1.4 \text{ kV}$, $V_{sc_min} = 0.7 \text{ kV}$ 。为验证能量管理中超级电容器电压环的工作情况,进行了超级电容器充、放电过程的仿真。如图 13 所示,超级电容器组经 300 s 的充电过程达到 $V_{sc_ref} = 1.1 \text{ kV}$,从 600 s 开始对超级电容器组放电,900 s 放电完毕。

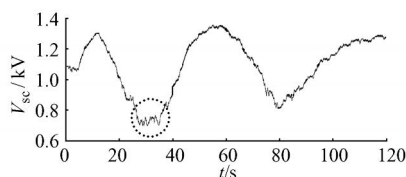


图 12 功率调节模式超级电容器组电压
Fig. 12 SC voltage in power mode

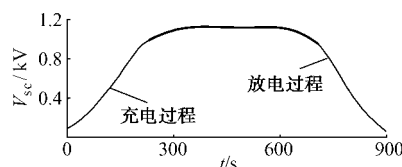


图 13 超级电容器充、放电模式超级电容器组电压
Fig. 13 SC voltage in charging/discharging mode

5 结语

本文针对基于超级电容储能的风电场功率调节装置的工作原理和结构特点,提出了网级控制、超级电容能量管理和变流器控制相结合的控制策略,并进行了风电场短时功率波动调节的仿真研究。仿真结果显示:设计的风电场功率调节装置具有良好的动态性能,不仅能很好地吸收风电场输出无功功率的波动成分,起到了抑制电网电压波动的作用,也有效地平滑了输入电网的有功功率波动。

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

参考文献

- [1] 雷亚洲, GORDON L. 风力发电与电力市场. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 1-5.
LEI Yazhou, GORDON L. Wind energy and electricity market. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 1-5.
- [2] BIALASIEWICZ J T, MULJADI E. The wind farm aggregation impact on power quality// Proceedings of the 32nd Annual Conference of IEEE Industry Electronic Society, November 7-10, 2006, Paris, France: 4195-4200.
- [3] LUO C, BANAKAR H, SHEN B, et al. Strategies to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 341-349.
- [4] CHONG H, HUANG A Q, BARAN M E, et al. STATCOM impact study on the integration of a large wind farm into a weak loop power system. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 226-233.
- [5] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [6] LI W, JOOS G. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm// Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, FL, USA: 1280-1285.
- [7] LI W, JOOS G, ABBEY C. Wind power impact on system frequency deviation and an ESS based power filtering algorithm solution// Proceedings of IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 29-November 1, 2006, Atlanta, GA, USA: 2077-2084.
- [8] BANOS C, ATEN M, CARTWRIGHT P, et al. Benefits and control of STATCOM with energy storage in wind power generation// Proceedings of IEEE International Conference on AC and DC Power Transmission, March 28-31, 2006, London, UK: 230-235.
- [9] LUND P D, PAATERO J V. Energy storage options for improving wind power quality// Proceedings of Nordic Wind Power Conference, May 22-23, 2006, Espoo, Finland: 1-7.
- [10] MU YEEN S M, ALI M H, TAKAHASHI R, et al. Wind generator output power smoothing and terminal voltage regulation by using STATCOM/ESS// Proceedings of IEEE Power Technology Conference, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: 1232-1237.
- [11] TAKAHASHI R, WU L, MURATA T, et al. An application of flywheel energy storage system for wind energy conversion// Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drives Systems, November 28-December 1, 2005, Kuala Lumpur, Malaysia: 932-937.
- [12] 陈星莺, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66.
CHEN Xingying, SHAN Yuanda. Application of superconducting magnetic energy storage system (SMES) in wind power system of network-forming. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 63-66.
- [13] 刘昌金, 胡长生, 李霄, 等. 基于超导储能系统的风电场功率控制系统设计. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 83-88.
LIU Changjin, HU Changsheng, LI Xiao, et al. Design of SMES control system for smoothing power fluctuations in wind farms. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 83-88.
- [14] CADADEI D, GRANDI G, ROSSI C. A supercapacitor-based power conditioning system for power quality improvement and uninterruptible power supply// Proceedings of IEEE Industrial Electronics Specialists Conference, July 8-11, 2002, L'Aquila, Italy: 1247-1252.
- [15] GAL KIN I, STEPANOV A, LAUGIS J. Outlook of usage of supercapacitors in uninterruptible power supplies// Proceedings of Baltic Electronics Conference, October 2-4, 2006, Tallinn, Estonia: 1-4.

李霄(1984—),女,博士研究生,主要研究方向:超级电容储能技术。E-mail: lixiao0223@zju.edu.cn

胡长生(1970—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力电子装置应用技术及新能源利用。E-mail: hucszju.edu.cn

刘昌金(1983—),男,博士研究生,主要研究方向:超导储能技术及风力发电技术。

Modelling and Controlling of SCES Based Wind Farm Power Regulation System

LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin, XU Dehong
(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The adverse impacts of wind power fluctuations on the power system become increasingly severe as wind turbine installation continues to grow. A super-capacitor energy storage (SCES) based wind power regulator is presented for smoothing power fluctuations and controlling wind farm terminal voltage. Based on the configuration and operation principle of the regulating system, a control strategy combining wind power control, super-capacitor voltage control and power conditioning system (PCS) control is proposed in detail. A dynamic small-signal model of PCS is presented for PCS controller design. The effectiveness of the device and control strategy is validated by simulation with PSCAD/EMTDC.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2007]120).

Key words: wind power generation; super-capacitor energy storage; power quality; small-signal model; control design