

基于 PLECS 的直驱永磁风电系统直接功率控制研究

包广清, 毛开富

(兰州理工大学电气工程与自动化学院, 兰州 730050)



摘要: 在研究风力机特性和永磁同步发电机运行机理的基础上, 建立了直驱式永磁风力发电系统数学模型, 在实现最大风能捕获的同时, 分析了负载变化对发电机侧电能转换单元控制参数的影响。对于网侧逆变器控制, 采用基于直轴虚拟电网磁链定向的直接功率控制, 避免了对电网电压的检测和电流闭环控制, 有效简化了系统结构, 提高了工作可靠性。通过在 Matlab/Simulink 环境下嵌入 PLECS 工具箱进行仿真研究, 结果表明该系统具有较好的控制鲁棒性和低电压穿越能力, 进一步验证了基于 PLECS 工具箱进行风电系统建模与仿真的可行性。

关键词: 风电系统建模; 最大功率追踪; 虚拟磁链定向; 直接功率控制; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2012) 08-1728-05

Direct Power Control of Direct-driven Wind Energy Conversion System Based on PLECS

BAO Guang-qing, MAO Kai-fu

(School of Electrical Engineering & Automation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the mechanism of wind turbine and characteristics of permanent magnet synchronous generator (PMSG), the mathematic models of direct-driven wind power generation system with PMSG were established. The relations between booster chopper modulation and load impedance variation were analyzed so as to estimate the optimal rotor speed of the wind turbine and implement the maximum power point tracking (MPPT). A virtual grid flux based direct power control (DPC) with space vector modulation for grid-connected converter was proposed. The active and reactive powers were used as the control variables instead of the currents applied in conventional voltage oriented control method. Moreover, grid voltage sensors were replaced by a virtual flux (VF) estimator. The complete model of the wind energy conversion system was established through the Matlab/Simulink PLECS Toolbox. The digital simulation results confirm that the low voltage ride through capability and control robustness, evaluating the feasibility of PLECS in modeling and simulation of wind energy conversion system.

Key words: wind energy conversion system modeling; maximum power point tracking; virtual flux oriented; direct power control; simulation

引言

能源与环境问题已成为全球可持续发展所面临的主要问题, 风力发电以其无污染和可再生性, 成为解决人类经济发展对石油的依赖性和减少二氧化碳排放的重要途径之一。近年来国际风电技术取得了突飞猛进地发展: 单机容量不断

提高, 兆瓦级风电机组实现商品化; 为提高风电机组的运行效率, 实现最大风能捕获, 新方案、新技术得到深入研究和广泛应用; 风力机的变桨距功率调节取代了定桨距调节, 发电机的变速恒频运行取代了传统的恒速恒频运行; 运行控制上实现了风电场的实时监控、远程测控及计算机群控, 提高了分布或并网运行的稳定性和电能质量^[1]。然而, 我国风电技术与世界先进技术相比还存在较大差异, 因此, 进行有自主知识产权的新型风电机组的理论与试验研究十分必要。

目前, 占风电市场份额最大的双馈风力发电系统结构简单, 功率变换器容量小, 由于依赖电网无功功率励磁运行,

收稿日期: 2010-08-30 修回日期: 2011-02-26

基金项目: 国家自然科学基金 (50877034)

作者简介: 包广清(1972-), 女, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动; 毛开富(1964-), 男, 重庆人, 本科, 高工, 研究方向为控制理论与控制工程。

<http://www.china-simulation.com>

发电机效率不高, 电机控制复杂, 需要配置升速齿轮箱, 适应风速范围窄。直驱式风电机组只通过网侧逆变器与电网相连, 简化了系统控制结构, 避免了升速齿轮箱带来的噪声污染, 提高了系统工作可靠性, 在低风速时具有更高的效率, 其不足之处是需要配置全功率变换器。因此, 研究直驱式风电机组的高效电能转换与控制技术, 进一步提高系统工作性能、降低成本, 具有重要的理论意义和实用价值。本文将在研究风力机运行机理和永磁同步发电机工作特性的基础上, 分析负载变化对发电机侧升压电路 PWM 控制参数的影响, 以此建立实现最大风能捕获的发电机侧电能转换单元最优控制方案。对于网侧逆变器控制, 采用虚拟电网磁链(VF-Virtual flux)定向的直接功率控制(DPC-Direct power control), 用磁链观测器代替电网电压检测, 避免了传统电压定向控制(VOC-Voltage oriented control)的坐标变换和电流闭环控制, 从而简化系统结构, 降低成本。最后, 将电力电子系统仿真工具 PLECS 引入 Matlab/Simulink 仿真平台进行仿真研究。PLECS 使用电力电子系统的理想开关和分段线性结构, 能精确计算电路中的电流和电压, 而且仿真速度快, 分析结果表明基于 DPC 的逆变器 SVPWM 控制可以实现发电机定子与电网用户之间的“柔性”连接和电能的“绿色”变换。

1 永磁直驱风电系统典型拓扑

具有永磁同步发电机(PMSG)的直驱式风电系统有内转子型和外转子型两种拓扑。图 1(a)内转子型是一种常规直驱发电机组, 即风力机和永磁体内转子同轴安装, 外定子绕组通过全功率变流器与电网连接。这种结构的发电机定子绕组和铁芯通风散热好, 转子外形尺寸小。图 1(b)外转子型是风力机与发电机外转子直接耦合, 内定子电枢安装在静止轴上。这种结构易于永磁体安装固定, 缺点是对电枢铁芯和绕组通风冷却不利, 永磁体转子直径大, 不易密封防护。

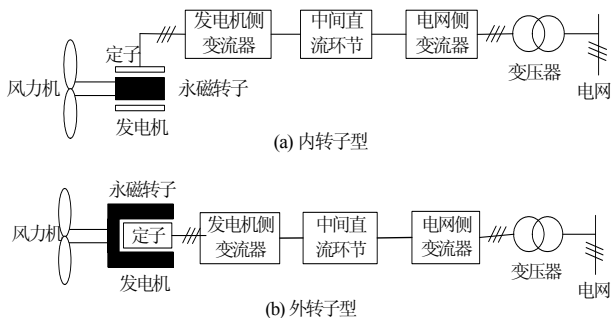


图 1 直驱式永磁风力发电系统拓扑

2 发电机侧变换器控制

2.1 直流变换器拓扑

风力发电系统的风力机是风能吸收装置, 其输出功率与风速关系密切, 根据贝兹(Betz)理论, 风力机在不同风速

下对应一个最佳运行转速, 此时对风能的捕获效率最高, 而且风力施加给叶片的机械应力最小, 所以希望直驱式风电机组运行在该转速下^[2]。由于采用永磁体励磁和二极管不控整流, 这里通过升压电路中功率开关管的占空比调节进行发电机转矩控制, 从而得到理想转速, 实现最大风能捕获目标。

2.2 最大风能追踪控制

根据图 2 发电机侧控制系统主电路结构图, 直流侧等效电阻 R_{in} 为:

$$R_{in} = (1-D)^2 R_L \quad (1)$$

二极管整流电路的等效电阻 R 为:

$$R = \frac{\pi^2}{18} (1-D)^2 R_L \quad (2)$$

若忽略发电机和输电线路损耗, 则发电机输出功率 P_e 为:

$$P_e = \frac{\pi^2}{6} (1-D)^2 R_L (K_m \omega_r)^2 / \left\{ \left[\frac{\pi^2}{18} (1-D)^2 R_L + R_s \right]^2 + X_s^2 \right\} \quad (3)$$

式中 R_s 和 X_s 分别是发电机每相电阻和感抗。由(3)式看出, 发电机功率 P_e 与占空比 D 和风速 V_w 值有关, 具有图 3 所示的非线性特性。在本系统中, 发电机反电势系数 $K_m = 1.4V/rpm$, $R_s = 1.764$, 发电机为 36 对极, 定子电感 $L_s = 2.8mH$, 运行风速 $14m/s$, 风力机 $\lambda_{opt} = 6.7$, $r = 2.803m$ 。如图 4 所示, 若负载 R_L 在 30Ω 到 50Ω 间变化, 则控制 $0.6 < D < 0.75$ 机组获得最大风能。

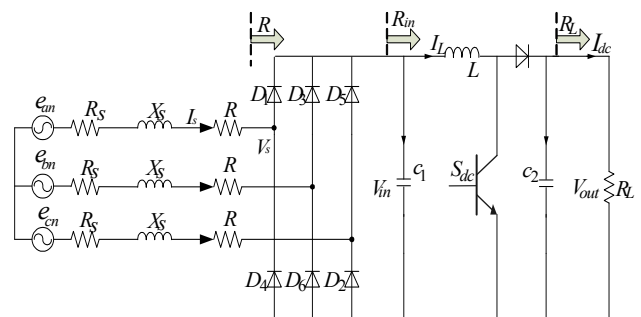


图 2 发电机侧控制系统主电路结构图

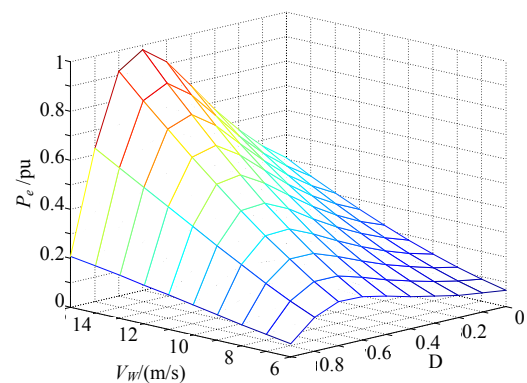


图 3 发电机输出功率 $P_e(D, V_w)$ 曲线

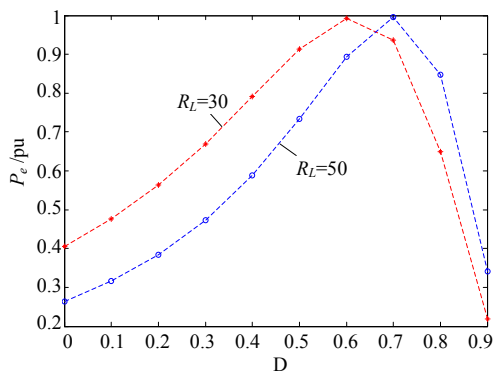


图 4 不同负载条件下发电机功率与占空比关系

3 基于虚拟磁链定向的逆变器直接功率控制

3.1 虚拟电网磁链定向概念

网侧逆变器在风电系统中至关重要，它提供恒定、可控的直流母线电压以及接近正弦的入网电流和可控的功率因数。为获得接近正弦的输入电流和快速直流母线控制，目前多采用基于 VOC 的电流矢量控制，需要复杂的坐标变换和脉宽调制算法，系统动静态性能很大程度上依赖于电流内环设计，控制参数整定也较复杂^[3,4]。为改进上述缺陷，本文借鉴三相交流电机直接转矩控制策略，采用基于虚拟磁链定向的逆变器直接功率控制^[5,6]。

由图 5 网侧逆变器直接功率控制结构图可以看出，若将网侧电压看作电机的定子感应电势，将电网滤波电感 L 及线路等效电阻 R 分别看作电机的漏感和定子电阻，则可以将逆变器网侧看作一台虚拟交流电机，这与逆变器驱动的交流电动机系统在拓扑结构上完全相似^[7]。类似于交流电机的磁场定向矢量控制，将电网电压看成虚拟磁链的微分量，而虚拟磁链估算不依赖于电网电压的检测，因此可以省去网侧电压传感器。

图 5 中 u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 是网侧电压， i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 是网侧电流， u_{dc} 是直流母线电压， S_a 、 S_b 、 S_c 是逆变器三

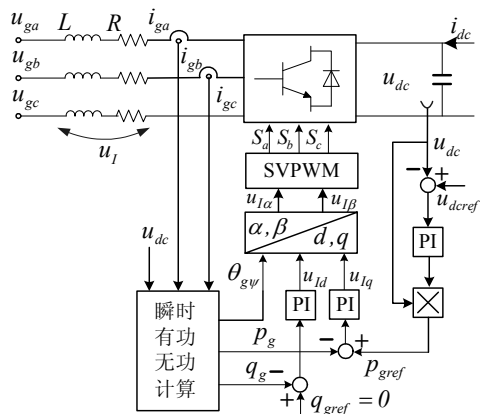


图 5 网侧逆变器直接功率控制原理图

相桥臂的开关函数， $S_{a,b,c} = 1$ 表示相应桥臂的上管导通，下管关断； $S_{a,b,c} = 0$ 表示桥臂下管导通，上管关断。逆变器电压 u_I 在静止坐标系下由式(4)和(5)确定：

$$u_I = S_w u_{dc} \quad (4)$$

$$S_w = \begin{bmatrix} -1/3(2s_a - s_b - s_c) \\ -1/3(2s_b - s_a - s_c) \\ -1/3(2s_c - s_a - s_b) \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 逆变器直接功率控制算法

图 6 是基于 d 轴虚拟电网磁链定向的网侧逆变器稳态矢量图，根据磁链定义建立网侧磁链和电压方程：

$$\psi_g = \int u_g \cdot dt \quad (6)$$

$$u_g = u_I + L \frac{di_g}{dt} \quad (7)$$

基于上述虚拟电网磁链概念，通过磁链估算实现逆变器有功功率和无功功率的解耦控制。在图 5 中，有功功率和无功功率与对应给定值的偏差量经过 PI 调节，再经过两相 d, q 旋转坐标系到 α, β 静止坐标系变换，分别得到逆变器电网虚拟磁链 $\psi_{g\alpha}$ 和 $\psi_{g\beta}$ ：

$$\begin{cases} \psi_{g\alpha} = \int u_{I\alpha} dt - L i_{g\alpha} \\ \psi_{g\beta} = \int u_{I\beta} dt - L i_{g\beta} \end{cases} \quad (8)$$

逆变器电压 $u_{I\alpha}$ 和 $u_{I\beta}$ ，电流 $i_{I\alpha}$ 和 $i_{I\beta}$ ：

$$\begin{cases} u_{I\alpha} = \frac{2}{3} u_{dc} (S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c)) \\ u_{I\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} u_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} i_{I\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{ga} \\ i_{I\beta} = \frac{\sqrt{2}}{2} i_{ga} + \sqrt{2} i_{gb} \end{cases} \quad (10)$$

DPC 控制的网侧有功功率和无功功率相当于电机的转矩和磁链，由此得到基于虚拟磁链的网侧有功功率 p 和无功功率 q ^[8]：

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} \omega (\psi_{g\alpha} i_{g\beta} - \psi_{g\beta} i_{g\alpha}) \\ q = \frac{3}{2} \omega (\psi_{g\alpha} i_{g\alpha} + \psi_{g\beta} i_{g\beta}) \end{cases} \quad (11)$$

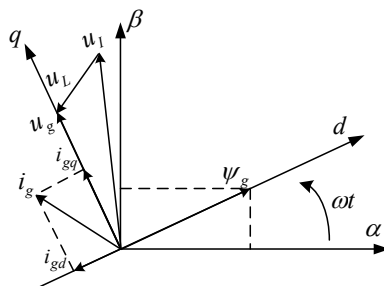


图 6 d 轴虚拟电网磁链定向的逆变器稳态矢量图

由于积分算式的低通特性, 通过虚拟磁链的坐标定向和积分运算可以对电网电压的低频谐波具有抑制作用。同时, 虚拟磁链的估算并不依赖于电网电压的检测, 可以省去网侧电压传感器, 进一步简化了硬件线路, 降低了系统成本。这里为实现逆变器入网电能的单位功率因数控制, 令无功电流 $i_{gd} = 0$ 。由式(12) d, q 坐标系下网侧电压方程得到式(13)逆变器控制电压 $u_{I\alpha}$ 和 $u_{I\beta}$:

$$\begin{cases} u_{gd} = -\omega L i_{gq} + u_{Id} = 0 \\ u_{gq} = R i_{gq} + L \frac{di_{gq}}{dt} + u_{Iq} = U \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} u_{I\alpha} \\ u_{I\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_{gv} & -\cos \theta_{gv} \\ \cos \theta_{gv} & -\sin \theta_{gv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{Iq} \\ u_{Id} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 U 是一个开关周期 T_s 内的电网电压平均值 $U = \frac{1}{T_s} \sum_0^{T_s} u_g$,

磁链矢量位置角:

$$\theta_{gv} = \arctg(\psi_{g\alpha} / \psi_{g\beta}) \quad (14)$$

4 直驱式PMSG风力发电系统仿真分析

4.1 仿真平台

基于以上分析, 在 Matlab/simulink 环境下嵌入 PLECS 工具箱搭建图 7 真系统。PLECS 工具箱是一种适用于既含有电路又含有复杂控制算法的电力电子系统仿真工具, 由瑞士苏黎世工学院的 J. Allmeling 和 W. Hammer 共同开发^[9]。PLECS 扩充了 Simulink 的功能, 用户可以在 Simulink 环境中以网络表的形式建立电路模型, 系统控制部分仍然可以调用 Simulink 的各种工具箱, 因此能完成较为复杂的建模任务。仿真过程中, 系统的电路部分与控制部分可以实现电压、电流信号及开关控制信号的交互作用, 并通过 MATLAB 强大的计算功能分析仿真结果。PLECS 区别于 MATLAB 电力

系统工具箱的显著特点是便于操作, 兼容性好 (作为 Simulink 的工具箱或独立使用), 计算速度快, 支持固定时步和可变时步计算模式; 可以用探针测量电压和电流, 这些测量可以作为 simulink 环境中的控制反馈或者只用于在线观察; 基于标准平台, 无移动成本, 不受计算机基础条件变化的影响。

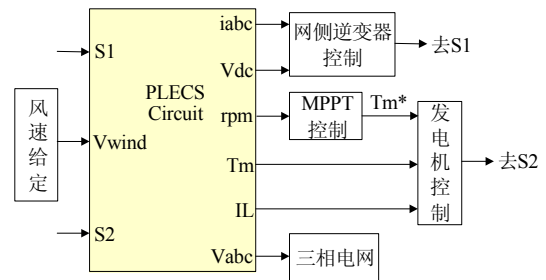


图 7 于 Matlab/ Simulink PLECS 工具箱的直驱风电系统仿真模

4.2 仿真试验

主要仿真参数: 电机参数: 功率 10MW, 额定转速 200rpm, 反势系数 1.4V/rpm; 转动惯量 10kg·m²; 系统参数: 母线电压 1100V, 变器开关频 2.5kHz; 采样时间 2ms。

根据国家电网风电厂并网技术规定, 提高风电机组的电网适应性尤其是低压穿越能力至关重要^[10], 在直驱式永磁风电机组中, 系统只通过网侧逆变器与电网相连, 因此, 在电网电压跌落瞬间, 必需通过网侧逆变器向电网提供无功支持, 保证机组具备一定的低电压穿越能力。图 8 是风速保持恒定条件下, 电网电压跌落故障过程中系统的动态调节过程。当电网电压在 0.02s 时突降 60%并逐步下降到 20%额定值, 系统有功功率随之逐步下降, 在 0.12s 故障消除后逐步

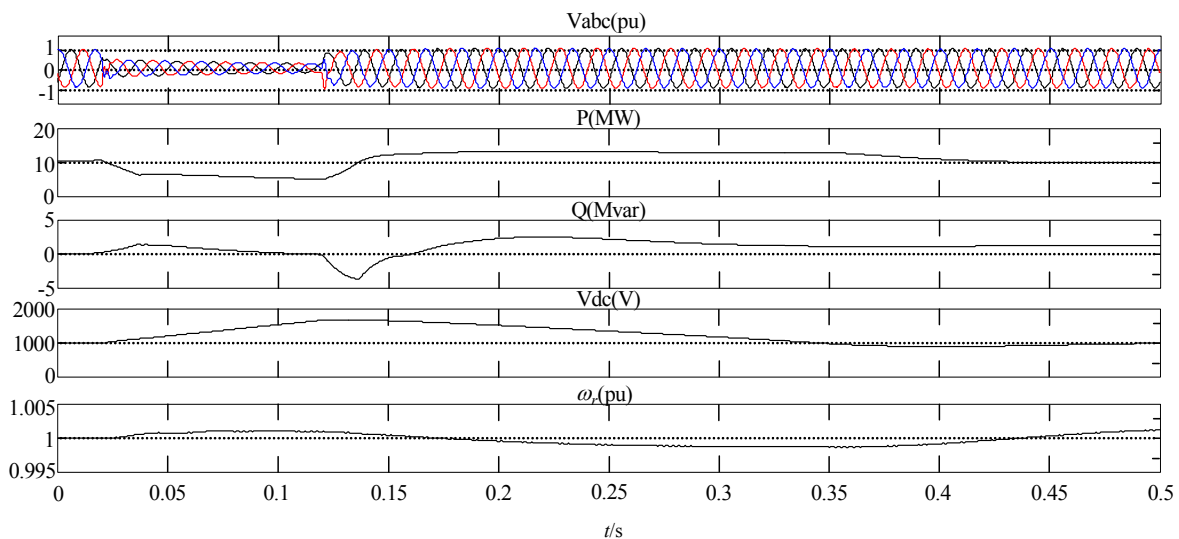


图 8 直驱式 PMSG 风力发电系统低压穿越动态仿真

上升, 0.4s 时恢复正常值。在故障发生的 100ms 内, 无功功率相应升高以提供系统必要的无功支持, 说明以上控制策略的正确性和有效性。在系统调节过程中, 网侧电压基本保持稳定, 由于风机的大惯性特性, 转速的动态变化过程相对电流、电压变化要缓慢得多, 受计算机存储空间的限制, 最大运行时间设定为 0.5s, 此时系统尚未完全进入稳定状态。

5 结论

针对经典交直交永磁直驱风力发电系统, 本文进行了风力机特性研究和发电机侧控制系统的解析分析, 明确了系统实现最大风能捕获的最优控制参数选择方案。同时还提出了虚拟电网磁链定向的网侧逆变器直接功率控制, 由磁链计算代替网侧电压传感器, 实现网侧有功功率和无功功率的解耦控制, 与目前较为成熟的基于同步旋转坐标系的 VOC 控制相比, 进一步简化了系统结构, 提高了工作可靠性。另外, 基于 PLECS 工具箱的系统建模和仿真结果表明, 与 MATLAB/SimPowerSystems 工具箱相比, PLECS 更易于信号测量, 且计算速度快, 系统兼容性好, 值得在复杂电力电子与电力传动系统的计算机仿真领域应用。

参考文献:

- [1] H Polinder, F F A van der Pijl, G J de Vilder, P Tavne. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines [C]// Proc IEEE Int. Conf. Electric Machines and Drives, San Antonio, USA. USA: IEEE, 2005: 543-550.
- [2] Bouscayrol A, Delarue P, Guillaud X. Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine [J]. Renewable Energy (S0960-1481), 2005, 30(15): 2273-2288.
- [3] 胡书举, 李建林, 许洪华. 基于永磁同步发电机的直驱风电双脉宽调制变频器的研制[J]. 动力工程, 2009, 29(2): 195-200.
- [4] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统及其自动化, 2003, 27(20): 62-67.
- [5] T Noguchi, H Tomiki, S Kondo, I Takahashi. Direct Power Control of PWM Converter without Power-Source Voltage Sensors [J]. IEEE Trans. Ind. Application (S0093-9994), 1998, 34(3): 473-479.
- [6] M Malinowski. Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers [D]. Warsaw, Poland: Warsaw University of Technology, 2001.
- [7] Martti Harmoinen, Vesa Manninen, Pasi Pohjalainen, et al. Method for controlling the power to be transferred via a mains inverter [P]. USA Patent, No. 5940286, 1999.
- [8] Peter Vas. Sensorless Vector and Direct Torque Control (ISBN 0-19-856465-1) [M]. UK: Oxford University Press, 1998.
- [9] J Allmeling, W Hammer. PLECS 3.0.6 User Manual [DB/OL] (2010). <http://www.plexim.com/downloads>.
- [10] 国家电网公司风电场接入电网规定 (修订版) [S]. 2009.
- [11] H Polinder, F F A van der Pijl, G J de Vilder, P Tavne. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines [C]// Proc IEEE Int. Conf. Electric Machines and Drives, San Antonio, USA. USA: IEEE, 2005: 543-550.
- [12] Van Mieghem P, Ge X, Schumm P, et al. Spectral graph analysis of modularity and assortativity [J]. Physical Review E. (S1539-3755), 2010, 82(5): 56113, 2010-2012.
- [13] Badham J, Stocker R. The impact of network clustering and assortativity on epidemic behavior [J]. Theoretical Population Biology (S0040-5809), 2010, 77(1): 71-75.
- [14] Hiroshi Nishiura A R C B. Assortativity and the Probability of Epidemic Extinction: A Case Study of Pandemic Influenza A (H1N1-2009) [Z]. Japan: Japan Science and Technology Agency, 2011: 2011, 194507.
- [15] Newman M, Girvan M. Mixing patterns and community structure in networks [J]. Physical Review E. (S1539-3755), 2002, 45(7):86-94.
- [16] Newman M E. Assortative mixing in networks [J]. Physical Review Letters (S0031-9007), 2002, 89(20): 208701.
- [17] Newman M E J. Mixing patterns in networks [J]. Physical Review E (S1539-3755), 2003, 67(2): 26126.
- [18] Zhao J, Tao L, Yu H, et al. The effects of degree correlations on network topologies and robustness [J]. Chinese Physics (S1674-1056), 2007, 16(12): 3571.
- [19] Dezso Z, Barabasi A L. Halting viruses in scale-free networks [J]. Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics) (S1539-3755), 2002, 65(5): 55101-55103.
- [20] Yang W, Chakrabarti D, Chenxi W, et al. Epidemic spreading in real networks: an eigenvalue viewpoint [M]. Florence, Italy: IEEE Comput. Soc, 2003.
- [21] Zhang H, Wang B. Different methods for the threshold of epidemic on heterogeneous networks [J]. Physics Procedia (S1539-3755), 2010, 3(5): 1831-1837.
- [22] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Immunization of complex networks [J]. Physical Review E. Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics (S1539-3755), 2002, 65(3 2A): 36101-36104.
- [23] Dobrescu R. A model of the immune system based on scale free networks [J]. WSEAS Transactions on Systems (S1109-2777), 2007, 6(1): 117-124.
- [24] Cohen R, Havlin S, Ben-Avraham D. Efficient immunization strategies for computer networks and populations [J]. Physical Review Letters (S0031-9007), 2003, 91(24): 247901.
- [25] Zhang J, Zhao H, Xu J, et al. Characterizing and modeling the Internet Router-level topology - The hierarchical features and HIR model [J]. Computer Communications (S0140-3664), 2010, 33(16): 2001-2011.
- [26] Wang Y, Xiao G, Hu J, et al. Imperfect targeted immunization in scale-free networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications (S0378-4371), 2009, 388(12): 2535-2546.