

双馈风电机组发电效率提升研究

赵燕峰¹, 李慧新¹, 刘璐¹, 黄禹文², 符伟杰¹

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为了提升双馈风电机组在弱风地区的竞争力, 文章在分析双馈机组发电效率构成及影响因素的基础上, 提出在低风速时段将双馈发电机定子短接的方法, 使其工作在感应异步电机状态, 从而提升双馈机组发电效率。仿真及实验结果表明, 采用该方法后双馈机组的发电量可提升 1.5% 左右。

关键词: 双馈风力发电机; 发电效率; 发电量; 低风速; 调速范围

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)06-0056-05

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.06.012

Research on the Generating Efficiency Improvement of Doubly Fed Wind Turbines

ZHAO Yanfeng¹, LI Huixin¹, LIU Lu¹, HUANG Yuwen², FU Weijie¹

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to improve the competitiveness of doubly fed wind turbines in low wind speed areas, it proposed a method to improve the generating efficiency of doubly fed wind turbines by shorting out the stator of doubly fed generator and making it work in the induction motor state during low-wind-speed period, based on the analysis of structure and influence factors of doubly fed wind turbine's generation efficiency. Simulation and experimental results showed that the power generation capacity could be increased by about 1.5%.

Keywords: doubly fed induction generator(DFIG); generating efficiency; electricity generation; low speed wind; speed adjusting range

0 引言

近年来我国风力发电行业发展迅速, 但由于电网对新能源容纳能力接近极限, 风力资源丰富的“三北”地区风电的发展速度相对减慢; 而靠近负荷中心的弱风地区由于没有限电影响, 风电发展规模反而更大。弱风地区的特点是年平均风速低, 双馈机组低风速下效率偏低从而导致发电量不足。本文研究双馈机组的发电效率构成及影响因素, 进而找到双馈机组运行在弱风工况时提升发电量的方法。

1 风电机组电气构成

风电机组前端的风轮捕获风能转化为机械能后, 由后端的发电机将机械能转换为电能。通常将后端的电能

转换系统称为风电机组的电气传动链。当前的电气传动链利用变流器实现变速运行, 其电路拓扑如图 1 所示,

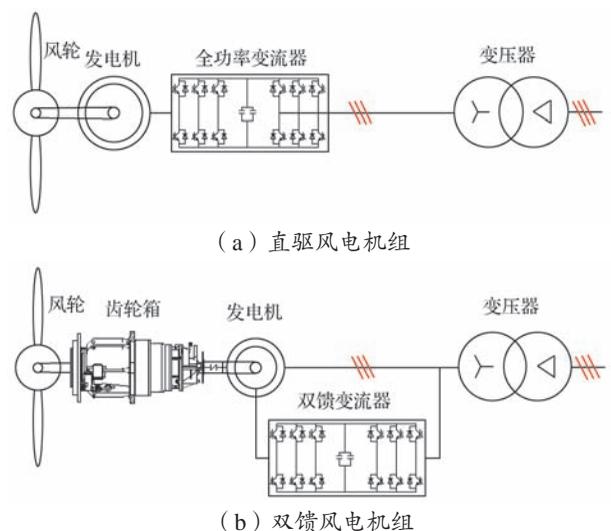


图 1 变速风电机组的电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of the variable speed wind turbine

收稿日期: 2017-06-01

作者简介: 赵燕峰 (1980-), 男, 高级工程师, 长期从事风电机组电气系统的理论研究及工程实现工作。

可分为基于双馈变流器的部分范围调速系统和基于全功率变流器的全范围调速系统。当前主流的双馈机组调速范围通常为同步转速的 ±30% 至 ±40%；而基于全功率变流器的风电机组（主要是直驱风电机组）的调速范围则为 0~100% 转速。

2 发电效率影响因素

下面从风电机组的空气动力学性能、齿轮箱、发电机和变流器等方面对双馈机组和直驱机组的发电效率进行分析比较。

2.1 风轮空气动力学性能

根据贝兹理论，风轮捕获的机械能可表示为^[1]

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (1)$$

式中： P_m ——风轮捕获的机械能； ρ ——空气密度； A ——风轮的扫风面积； v ——风速； C_p ——风能利用系数。

可见，对于同一风轮，在相同条件下， C_p 越高，捕获能量效率越高。在额定功率以下，桨距角基本保持在 0° 附近，可近似认为是定值，因此 C_p 主要由叶尖速比 λ 决定。 λ 的计算公式为^[2]

$$\lambda = \frac{2\pi \times n_r \times r}{60 \times v} \quad (2)$$

式中： n_r ——风轮转速； r ——风轮半径。

风轮转速决定叶尖速比，进而决定 C_p ，最终决定风轮的输入功率。双馈机组是部分范围调速系统，在低风速段，受最低并网转速的限制， C_p 不能保持最佳值（双馈机组实际 C_p 与理想 C_p 曲线如图 2 所示）；而直驱机组由于是全范围调速系统，在低风速段， C_p 能够保持理想值，保证风电机组的输入能量最优。可见，在风轮直径与风况相同的情况下，双馈机组和直驱机组的效率差异主要在低风速段。

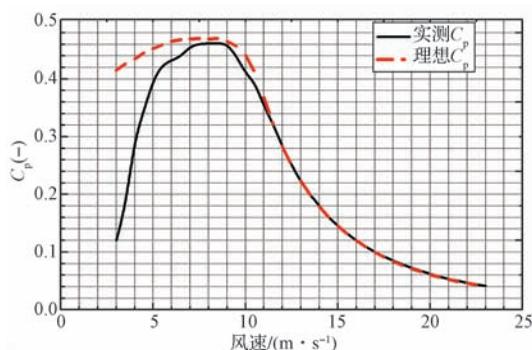


图 2 双馈机组实际 C_p 与理想 C_p 的对比

Fig. 2 Comparison between the practical C_p and the ideal C_p of doubly fed wind turbines

2.2 齿轮箱效率

直驱机组没有齿轮箱，本节齿轮箱效率的讨论仅适用于双馈机组。风轮受限于长叶片构成的巨大机械结构，

额定转速通常在 20 r/min 以下；而双馈电机为了保持高的功率密度、减小体积和重量通常要求较高的转速，典型的额定转速在 1 500 r/min 以上，齿轮箱即用于匹配风轮的低转速和双馈电机的高转速。双馈电机的齿轮箱通常由 3 级构成，升速比在 100 左右，升速比越大齿轮箱的效率越低。

齿轮箱的损耗主要由啮合损耗和搅油摩擦损耗构成，可表述为^[3]

$$P_{\text{loss-GearBox}} = \beta P_{\text{low}} + \varepsilon P_{\text{nom}} \frac{\omega_r}{\omega_{\text{nom}}} \quad (3)$$

式中： $P_{\text{loss-GearBox}}$ ——齿轮箱损耗； β ——啮合损耗系数； P_{low} ——低速端输入功率； ε ——搅油摩擦损耗系数； P_{nom} ——齿轮箱高速轴输出功率； ω_r ——高速轴角速度； ω_{nom} ——齿轮箱额定角速度。

式（3）中相关参数值均可以通过齿轮箱的型式试验得到。

2.3 发电机-变流器系统效率

2.3.1 双馈机组

双馈电机的损耗包括铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗。对某具体的双馈电机，在应用层面，铜损基本没有优化的空间；要降低铁损，需要降低双馈电机的电压；降低转速可以减少机械损耗；杂散损耗也没有优化的空间。

变流器的损耗主要由导通损耗和开关损耗构成，相关文献^[4-6]已有较多讨论，此处不再赘述。

2.3.2 直驱机组

永磁电机感应电势可表示为

$$E_s = 4.44 \times K_{w1} \times W_1 \times \frac{n \times p}{60} \times \Phi_m \quad (4)$$

式中： E_s ——感应电势； K_{w1} ——绕组系数； W_1 ——匝数； n ——转速； p ——极对数； Φ_m ——气隙磁通。

对于某具体的永磁电机，绕组系数、匝数、极对数和气隙磁通固定，其感应电势与转速成正比。永磁电机等值电路如图 3 所示。

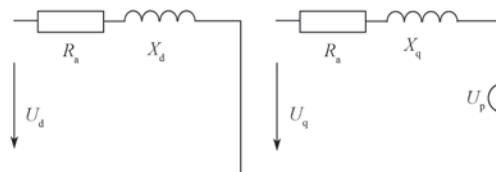


图 3 永磁电机等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of permanent magnet motor

目前，直驱机组普遍采用 690 V 等级的低压变流器。当永磁电机输出电压达到 690 V 时，转速若再升高，为了将永磁电机的输出电压限制在变流器可承受的范围内，需要采取弱磁控制，向电机注入无功电流，减少气

隙磁场。无功电流的注入，改变了永磁电机的功率因数，也增大了变流器的工作电流，在有功不变的情况下，使发电机-变流器系统的效率下降。

虽然单独的永磁电机和单独的全功率变流器效率都很高，但随着转速升高，机组功率也增大，系统进入弱磁运行后，总效率开始降低，如图4所示。

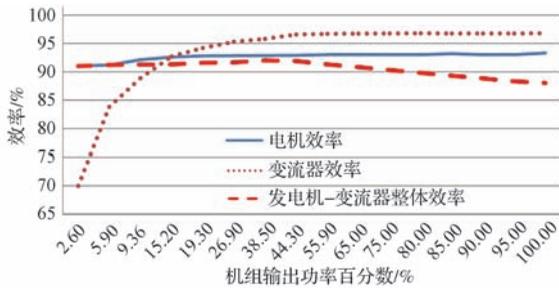


图4 某永磁电机和全功率变流器效率曲线
Fig. 4 Efficiency curves of permanent magnet motor and full power converter

由图4可知，直驱的电气传动链大约在45%额定功率时效率达到最高，此时永磁电机输出电压到达额定值；随着机组输出功率的继续升高，变流器对发电机进行弱磁控制，导致直驱电气传动链效率降低。

2.4 计算实例

以某2 MW风电机组为例，在风轮相同的情况下，双馈机组风轮的转速范围依据实际值取7.88~13 r/min，双馈电机的转速范围是1 000~1 650 r/min；直驱机组风轮的转速为3.94~13 r/min，约8 r/min时永磁电机达到额定输出电压715 V。

双馈机组齿轮箱效率按式(3)计算，其中β取0.0175，ε取0.015。双馈电机和变流器的效率按图5所示的实测曲线取值。

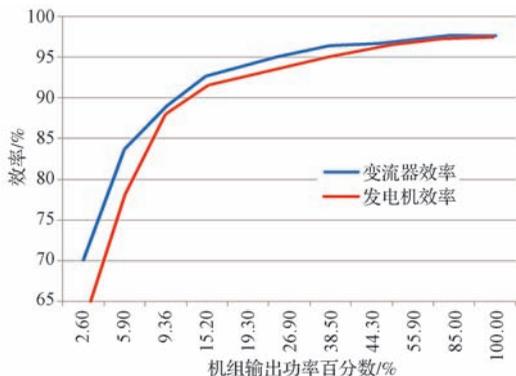


图5 某双馈电机和变流器实际效率
Fig. 5 Practical efficiencies of doubly fed generator and converter
与双馈机组风轮相同的2 MW直驱机组的整机效率按图6所示的实测值计算。由于直驱机组的调速范围更大，因此风轮具有更好的空气动力学性能，从而具有更高的效率；在稍大功率情况下，双馈电机效率占优。整机效率的对比见图6。

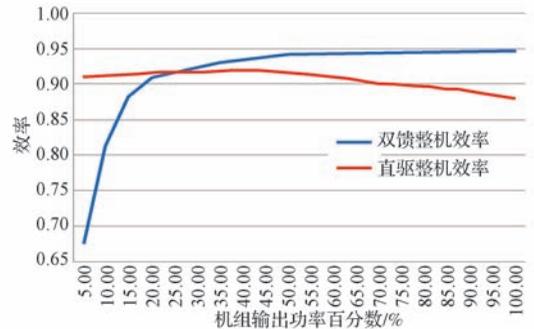


图6 直驱与双馈机组的整机效率对比
Fig. 6 Comparison of the efficiency between direct drive wind turbines and doubly fed wind turbines

从整机效率对比可以看出，在低功率段，直驱机组整机效率占优；而高功率段，双馈机组虽然有齿轮箱损耗，但高速双馈电机的效率仍高于低速永磁电机，这是因为双馈变流器只对转子功率产生损失，而转子功率不到整机功率的20%，而直驱机组的全功率变流器对100%的功率产生效率损失，所以双馈机组的整机效率占优。

3 双馈机组发电效率提升措施

对比双馈机组与直驱机组的效率组成及影响因素可知，要提升双馈机组的效率，需要采取如下措施：(1) 拓展双馈系统的调速范围，以提升机组低速段的空气动力效率；(2) 减少齿轮箱搅油摩擦损耗，进而提升机械效率；(3) 提升发电机和变流器的运行效率，从而提升电气转换效率。

双馈电机等值模型如图7所示。文献[7]论述了当双馈电机的调速范围扩大至与直驱电机的全范围相同时，双馈系统就失去了自身固有的经济性，效率也会降低。因此，从保持双馈系统的经济性和高效率方面考虑，其调速范围不宜超过同步转速的±40%。

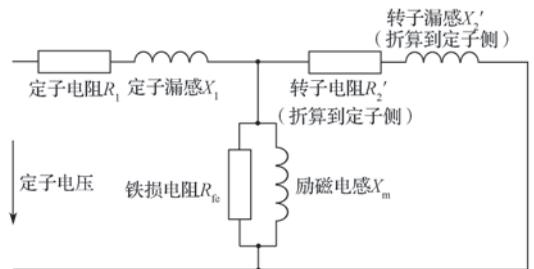


图7 双馈电机等值模型

Fig. 7 Equivalent model of doubly fed generator

双馈机组的特点是定子直接并网，转子通过变流器并网。对于风电机组的特殊运行工况，低转速也意味着低功率。将双馈电机的定子短接后，等值电路如图8所示，可将其看作是定子旋转而转子相对静止的普通感应电机，电机的全部能量通过转子输出到双馈变流器，通过变流器送入电网。

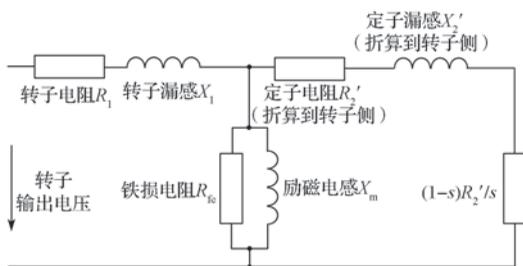


图8 双馈电机定子短接后等值电路

Fig. 8 Equivalent circuit of doubly fed generator when its stator shorted out

低速时，双馈电机定子短接，等效为普通感应电机，全部能量由转子经变流器送至电网。此时双馈电机的定子电压不再是固定的 690 V，可以在 0~690 V 之间依据最优运行效率进行调节，通过机侧电抗器和变流器，进行 Boost 升压从而并入电网。

对于特定型号的双馈机组，当定子短接后，机组的调速范围不受最低转速的约束，机组可以进行最大风能捕获。在风速确定、齿轮箱效率已知的情况下，发电机的机械输入功率 P_m 可知，其与定子电流的关系可表示为

$$I_s = \sqrt{\frac{sP_m}{3R_2'(1-s)}} \quad (5)$$

式中： I_s ——定子电流。

由于 P_m 为已知量， I_s 只与转差率 s 有关。如图 8 的等值电路中，感应电势可以表示为

$$E = \frac{I_s R_2'}{s} + j\omega X_2' I_s \quad (6)$$

式中： E ——电机感应电势。

转子电流和转子电压可由式 (7) 和式 (8) 表示：

$$I_r = I_s - \frac{E}{(X_m + jR_{fe}) \frac{R_{fe} + X_m}{R_{fe}^2 + X_m^2}} \quad (7)$$

$$V_r = I_r(R_1 + j\omega X_1) + E \quad (8)$$

式中： I_r ——转子电流； V_r ——转子电压。

此时电机的效率可以表示为

$$\eta = \frac{P_r}{P_m} = \frac{V_r I_r}{P_m} \quad (9)$$

式中： P_r ——转子功率。

对于风电机组，电机的输入功率、转速、转矩由整机控制策略、风速等决定，是已知量。在电机参数已知的情况下，式 (9) 变为只含变量 s 的函数，对其求导可得效率最大情况下的 s 值。当电机工作在发电状态时，其机械转速 n_m 和转差率 s 已知，可以计算得出变流器最优效率运行时的频率：

$$f = \frac{p \times n_m}{60 \times (1-s)} \quad (10)$$

由式 (7) 得到电机转子输出电流，由式 (8) 得到电机的输出电压，由此可以确定变流器的工作参数。

由于风电机组工作的特殊性，电机的机械转速和转矩由整机控制策略和风速共同确定，是客观确定的值，在这样的约束条件下，短接双馈电机的定子后，发电机和变流器存在最优效率运行的匹配性，在最优效率运行时，机组可以输出最多的发电量。

4 应用实例

对于某型 2 MW 机组，在低风速段将双馈电机定子短接而高风速段恢复到原来状态，并在 Bladed 软件平台上按相同叶片但不同转速范围对空气动力学性能进行仿真分析，对发电机和变流器的真实效率进行实测，以验证效率提升效果。

4.1 效率的提升

对于 2 MW 双馈机组，将风轮的最低运行转速由原来的 7.88 r/min 扩展至 0，可以将低风速段的空气动力学性能发挥到最优，从而获得与直驱机组相同的空气动力学性能。在同样的风况和风轮情况下，采用 Bladed 仿真软件对提升后（电机最低转速为 500 r/min）和提升前（电机最低转速为 1 000 r/min）时风轮的捕获能量进行计算，结果如图 9 所示。

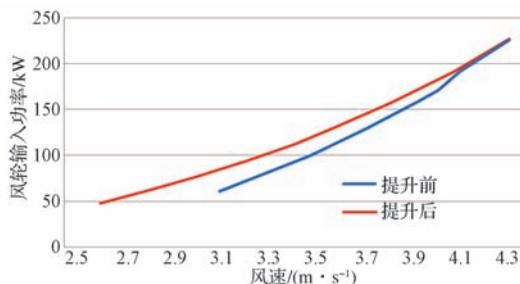


图9 风轮输入功率对比

Fig. 9 Comparison of input powers of wind turbine

由图 9 可以看出，调速范围扩大后，由于空气动力学性能的改善，2.5 m/s 风速下，风轮即有足够的功率输入，可以并网；而之前则需要 3 m/s 的风速才能捕获达到并网条件的最低功率，效率曲线的改善一直持续到 4.3 m/s 的风速。

发电机 - 变流器系统和齿轮箱损耗降低曲线如图 10 所示。双馈机组低功率运行时（如 4.5 m/s 以下风速，或 200 kW 以下输入功率），发电机的主要损耗来自铁损和机械损耗（铜损和杂散损耗相对较小，不到总损耗的 1/10，此处忽略）。对于该 2 MW 双馈电机，小功率时铁损约为 27 kW，机械损耗约为 12.5 kW；当转速由 1 000 r/min 降低到 500 r/min 时，机械损耗降低到 4 kW，节省了约 8.5 kW 损耗。对于双馈机组而言，此时发电机等值模型如图 8 所示，小功率运行时，电机电压不再固定为 690 V，可以根据运行功率和转速进行弱磁控制，使电机在最优效率下运行，从而大幅降低铁

损。同时,当该双馈机组的最低转速由 1 000 r/min 降低至 500 r/min 时,齿轮箱的搅油摩擦损耗降低了约 19 kW。

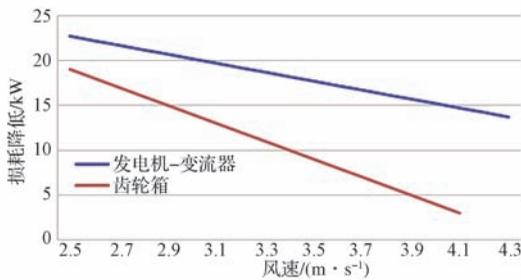


图 10 发电机-变流器系统和齿轮箱损耗降低曲线
Fig. 10 Loss reduction curves of the generator converter system and its gearbox

随着双馈机组齿轮箱和发电机的转速下降,齿轮箱的搅油摩擦损耗、发电机的机械损耗、低功率下双馈变流器的励磁电流均下降,进而变流器工作电流降低,变流器损耗下降,也就是说风轮、齿轮箱、发电机、变流器效率均提高。

在前端风轮输入功率相同的情况下,效率提升后的双馈机组整机效率与某直驱机组整机效率曲线^[7]对比如图 11 所示。

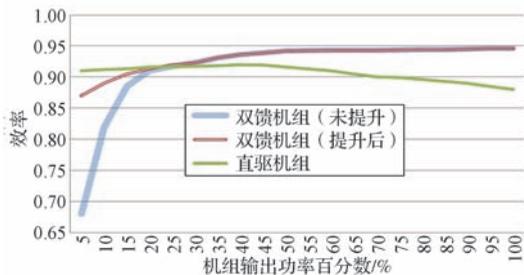


图 11 整机效率对比曲线

Fig. 11 Comparison of overall efficiency curves

从图 11 可以看出,优化后,双馈机组低功率段效率有所上升,比传统双馈机组的高,但比直驱机组的仍要低;在高功率段,双馈机组的效率高于采用低速永磁电机的直驱机组的。

4.2 发电量的提升

根据实际风况(图 12,其中区域 P 为低风速地区,区域 W 为高风速地区)的风速分布,以某型 2 MW 风电机组为例,分别计算传统双馈、优化后双馈及直驱机组的发电量(图 13),以比较发电量的提升。

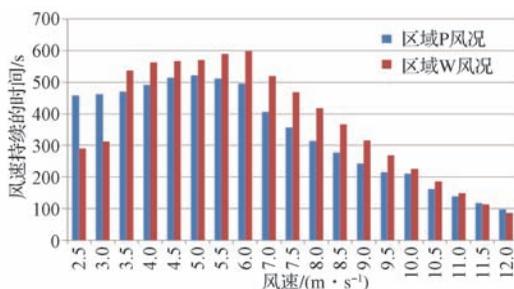


图 12 风速分布

Fig. 12 Distribution of wind speed

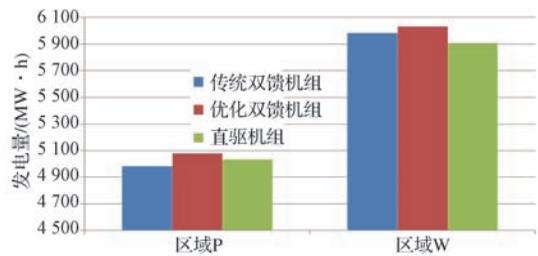


图 13 发电量对比

Fig. 13 Comparison of electricity generation

在区域 P 对应的风况中,直驱机组较传统双馈机组发电量多约 1%;效率提升后,双馈机组发电量增加约 2%,反而比直驱机组的多约 1% 的发电量;在区域 W 对应的风况中,由于风速较高,传统双馈机组发电量较直驱机组多 1%,效率提升的双馈机组较直驱机组发电量多出约 2%。

可见,在较低风速的地区,双馈机组通过效率提升,在发电量上可以实现对直驱机组的反超;在较高风速的地区,双馈机组通过效率提升,在发电量上可以实现对直驱机组形成更大的优势。

5 结语

通过在低风速时短接双馈电机的定子,将全部能量由转子输出经变流器送入电网,使得双馈机组在低风速段效率逼近直驱机组,在高风速段效率超过直驱机组,效率提升后的双馈机组对传统双馈机组和直驱机组在发电量上形成优势。这种方式降低了双馈机组在低功率运行时的铁损和机械损耗,变流器可以对发电机进行最优效率控制,提升了发电机-变流器系统的效率;降低了齿轮箱的搅油摩擦损耗,因而提升了齿轮箱的效率;拓展了双馈机组的调速范围进而提升了双馈机组风轮的空气动力效率。

参考文献:

- [1] HANSEN L H, HELLE L, BLAABJERG F. Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines [M]. Denmark: Risø National Laboratory, 2001: 7-16.
- [2] 武鑫. 风能技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 38-92.
- [3] ULLAHA N, OH Y T. Mathematical Modeling and Simulation of DFIG Wind Turbine and Comparison with Industrial Data [J]. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences, 2015, 14(1): 236-249.
- [4] TAMURA J. Calculation Method of Losses and Efficiency of Wind Generators [J]. Renewable Energy, 2015, 81: 389-399.
- [5] 崔纳新. 变频驱动异步电动机最小损耗快速响应控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2005: 20-52.
- [4] 胡建辉, 李锦庚, 邹继斌, 等. 变频器中的 IGBT 模块损耗计算及散热系统设计 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 159-163.
- HU J H, LI J G, ZOU J B, et al. Losses Calculation of IGBT Module and Heat Dissipation System Design of Inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 159-163.
- [5] JUAN M R, JOSE L F. Incidence on Power System Dynamics of High Penetration of Fixed Speed and Doubly Fed Wind Energy Systems: Study of the Spanish Case [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1089-1095.