

一种考虑损耗的风电系统MPPT控制方法研究

赵 勇, 冯延晖, 邱颖宁

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘 要: 考虑永磁同步风电系统的损耗,设计一种优化系统输出功率的最优功率控制方法,通过 Matlab/Simulink 软件对风电系统建模,对常规最优转矩控制和新的控制方法进行仿真对比,结果显示新的控制方法对优化系统输出功率有明显效果。

关键词: 风力发电; MPPT; 转矩控制; 输出功率; Simulink

中图分类号: TK89

文献标识码: A

0 引 言

最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)效率优化是提高风电运营企业经济效益的重要手段^[1]。MPPT 是风电系统机侧部分在额定风速以下的主要运行策略,常见的 MPPT 方法可分为 2 大类,一是寻优法,如扰动观察法、爬山法等;二是最佳风力机特性曲线法,如最佳叶尖速比法、最佳转矩控制和最佳功率控制等^[2,3]。

寻优法无需知道风力机的特性曲线,无需检测风速,与基于最佳风力机功率曲线法相比存在跟踪速度慢且当风速变化过快时跟踪失效等缺点,适用于转动惯量小且风力机参数不明确的系统。基于最佳风力机功率曲线法则需知道风力机最佳特性曲线,跟踪速度较快,适用于转动惯量大且风力机参数明确的系统^[4]。常规的基于风力机功率曲线法^[5-7]对风能利用系数优化,跟踪速度快,适用于变风速情况,但忽略了系统中损耗对系统输出功率的影响。

文献[8]考虑永磁同步发电系统中风力机传递给发电机(PMSG)的机械功率产生的铁耗、机械损耗及杂散损耗,提出补偿损耗转矩的最优转矩控制方法,能更加精准地控制发电机转速,使风力机工作在最佳叶尖速比的状态,但该法未考虑控制策略对发电机三相电流所产生的铜耗的影响。本文提

出一种考虑风电系统发电机铜耗的最优转矩控制方法,通过铜耗计算优化控制算法,达到提升风电系统总体发电效率的目的。利用 Matlab/Simulink 永磁直驱风电系统仿真模型进行验证。

1 考虑发电机铜耗的风力发电系统模型

1.1 风力机模型

风力机从风能中捕获的机械功率由式(1)表示^[9]。

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

式中, P_m ——机械功率, W; ρ ——空气密度, kg/m³; R ——风力机叶片半径, m; C_p ——风能捕捉系数; λ ——叶尖速比; β ——桨距角, (°); v ——风速, m/s。

风能捕捉系数由式(2)表示。

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2/\lambda_i - c_3\beta - c_4)e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + c_7\beta} - \frac{c_8}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $c_1 \sim c_8$ ——经验公式中常量,其中 $c_1=0.5176$ 、 $c_2=116$ 、 $c_3=0.4$ 、 $c_4=5$ 、 $c_5=21$ 、 $c_6=0.0068$ 、 $c_7=0.08$ 、 $c_8=0.035$; λ_i ——简化公式的结构变量。

不同风速下,风力机的转速与功率的曲线不

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(51505225); 江苏省自然科学基金(BK20131350); 江苏省六大人才高峰(ZBZZ-045); 中央高校基本科研业务费专项(30915011324)

通信作者: 冯延晖(1977—), 男, 博士、副教授, 主要从事新能源科学与工程、电力电子与电力传动方面的研究。yanhui.feng@njjust.edu.cn

同,但均有一个功率最大点,即风能最大捕捉点。当风速变化时,只要将转速调节到对应功率最大点的转速,即调到最优叶尖速比,就能实现最大风能捕捉,这也是常规最佳风力机特性曲线法捕捉最大风能的普遍方法。

在额定风速以下工作时,风电系统机侧部分不需要进行桨距角控制,令桨距角 $\beta=0$ 。同时,叶尖速比定义为 $\lambda = \frac{\omega R}{v}$,其中 ω 为叶轮的转速。

风力机输出的机械转矩 T_m 由式(3)表示。

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} = v^2 \left(\frac{d_1 v^2}{\omega^2} - \frac{d_2 v}{\omega} \right) e^{-\frac{d_3 v}{\omega} + d_4} + d_5 v^2 \quad (3)$$

式中, $d_1 = \frac{c_1 c_2 \rho \pi R}{2}$; $d_2 = (c_1 c_2 c_8 + c_1 c_4) \frac{\rho \pi R^2}{2}$; $d_3 = \frac{c_5}{R}$; $d_4 = c_3 c_8$; $d_5 = \frac{c_6 \rho \pi R^3}{2}$ 。

1.2 永磁同步电机模型

常规最优转矩控制的风力发电系统,需要控制发电机的电磁转矩来控制风力机的机械转矩,达到间接控制风力机转速的目的,实现最大风能捕捉。而要控制发电机的电磁转矩则需建立永磁同步电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)的精确模型,即考虑其铜耗、铁耗、机械损耗和杂散损耗等来模拟发电机的真实运行工况。由于机械损耗及杂散损耗缺乏经验公式无法准确模拟,但占总损耗比例较小,因此本文的 PMSG 建模过程中,只考虑发电机的铜耗及铁耗。

永磁同步电机在 $d-q$ 旋转坐标系下的定子电压方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_r L_q i_{qs} - L_d p i_{ds} \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \lambda_r - L_q p i_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

式中, u_{ds} 、 u_{qs} —— $d-q$ 旋转坐标系下的定子电压, V; i_{ds} 、 i_{qs} —— $d-q$ 旋转坐标系下的定子电流, A; R_s ——定子电阻, Ω ; ω_r ——转子转速, rad/s; L_d 、 L_q —— $d-q$ 旋转坐标系下的定子电感, H; p ——微分算子。

永磁同步电机电磁转矩 T_e 由式(5)表示。

$$T_e = \frac{3P}{2} [\lambda_r i_{qs} - (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (5)$$

采用零 d 轴电流控制时, T_e 由式(6)所示。

$$T_e = 1.5 P \lambda_r i_{qs} \quad (6)$$

式中, λ_r ——转子磁链, Nm; P ——极对数。

由式(6)可看出,通过控制发电机的电流可控制永磁同步电机的电磁转矩。

1.3 计算发电机铜耗

发电机铜耗 P_{cu} 可由式(7)表示^[10]。

$$P_{cu} = 3 R_s I_1^2 \quad (7)$$

式中, I_1 ——三相电流中一相电流的有效值, A,

$$I_1 = \frac{\sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}}{\sqrt{2}}。$$

最优转矩控制中,电流的控制采用零 d 轴电流控制,发电机铜耗由式(8)表示。

$$\begin{cases} i_{ds} = 0 \\ i_{qs} = \frac{T_e}{1.5 P \lambda_r} \end{cases}, P_{cu} = \frac{3}{2} \left(\frac{T_e}{1.5 P \lambda_r} \right)^2 R_s = K_1 T_e^2 \quad (8)$$

式中, $K_1 = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{1.5 P \lambda_r} \right)^2 R_s$ 。

考虑发电机铜耗,忽略其他损耗的前提下,发电机的输出功率 P_e 由式(9)表示:

$$P_e = P_m - P_{损} \approx P_m - P_{cu} \quad (9)$$

式中, $P_m = \omega T_m$, 稳态时 $T_e = T_m$, 因此 P_e 可由式(10)表示。

$$P_e = \omega T_m - K_1 T_m^2 \quad (10)$$

常规的最优转矩控制通过控制发电机 $d-q$ 电流来控制发电机的电磁转矩,从而进行最大风能利用系数的捕捉。但由于控制发电机的电磁转矩需控制发电机的三相电流,间接影响了发电机的铜耗,使未考虑铜耗的最优转矩控制无法得到理论上风电系统输出功率的最大值。

2 最优功率跟踪控制策略

2.1 常规最优转矩控制策略

常规的最优转矩控制是根据风力机的特性曲线计算出风力机的最优叶尖速比(λ_{opt}),通过控制发电机的电磁转矩来间接控制发电机转速,使风力机工作在最优叶尖速比(最大风能利用系数 C_{Pmax})的状态,从而实现风力机最大轴功率(P_{mmax})输出。控制算法中转矩与转速的关系可由式(11)推出^[11]。

$$\begin{cases} P_{mmax} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{Pmax} v^3 \\ \lambda_{opt} = \frac{\omega R}{v} \\ P_{mmax} = \omega T_m \end{cases} \quad (11)$$

转矩与转速关系由式(12)表示。

$$T_m = \frac{P_{m\max}}{\omega} = \frac{C_{P\max} \rho \pi R^5 \omega^2}{2 \lambda_{\text{opt}}^3} = k_{\text{opt}} \omega^2 \quad (12)$$

式中, $k_{\text{opt}} = \frac{C_{P\max} \rho \pi R^5}{2 \lambda_{\text{opt}}^3}$; 对于本文的风力机模型, $\beta=0$, 最优叶尖速比 $\lambda_{\text{opt}}=8.1$, 最大风能捕捉系数 $C_{P\max}=0.48$ 。

推导出发电机的电磁转矩与转速之间的关系, 将转速作为反馈量, 控制转矩使风力机工作在期望的工作状态, 实现风力发电系统的最大风能捕捉。

常规最优转速控制的电功率输出 P_e 由式(13)表示。

$$\begin{aligned} P_e &= \omega T_m - K_1 T_m^2 \\ &= k_{\text{opt}} \omega^3 - K_1 k_{\text{opt}}^2 \omega^4 \\ &= \frac{k_{\text{opt}} \lambda_{\text{opt}}^3}{R^3} v^3 - \frac{K_1 k_{\text{opt}}^2 \lambda_{\text{opt}}^4}{R^4} v^4 \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $\omega = \frac{\lambda_{\text{opt}} R}{v}$ 。

对于常规最优转矩控制, 由于控制最佳叶尖速比恒定, 风电系统输出电功率只与风速有关, 这时风力机的轴功率输出为最大值, 但由于未考虑铜耗的问题, 系统电功率输出并非理论上的最大值。

2.2 改善后最优功率控制策略

改善后最优功率控制是通过系统输出电功率计算, 寻找系统最大输出电功率时风力机的工作状态, 再通过控制发电机的电磁转矩来控制风力机转速, 实现系统的最大电功率输出。

由式(14)可知系统输出电功率与转速和转矩的关系, 由于转矩和转速的非线性耦合关系, 计算最大输出电功率时, 无转速的解析解。

$$\begin{cases} P_e = \omega T_m - K_1 T_m^2 \\ T_m = v^2 \left(\frac{d_1 v^2}{\omega^2} - \frac{d_2 v}{\omega} \right) e^{\frac{d_3 v}{\omega} + d_4} + d_5 v^2 \end{cases} \quad (14)$$

对应每一个风速, 可求使 P_e 最大对应转速的数值解, 从而得出对应的转矩, 图 1 为计算原理框图。把每一个风速的最优 P_e^* 、 T_m^* 、 ω^* 值求出来, 列一个控制转速和转矩关系列表, 根据风力机特性就可无需测量风速进行最优功率控制。

3 仿真研究

仿真建立的风电系统参数如表 1 所示。

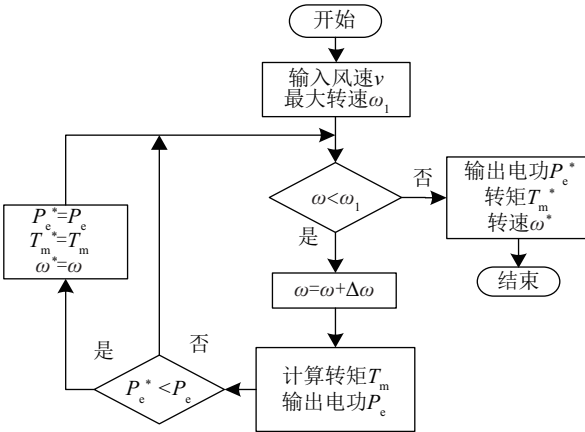


图 1 最优输出功率计算原理框图
Fig. 1 Calculation block diagram of optimal output power

表 1 风力机与发电机参数
Table 1 Parameters of wind turbine and generator

风力机参数	数值	永磁同步发电机参数	数值
桨叶半径/m	1	定子电阻/Ω	18.7
空气密度/kg·m ⁻³	1.225	d轴电感/mH	60
最佳叶尖速比	8.1	q轴电感/mH	60
C _{Pmax}	0.48	转动惯量/kg·m ²	0.001469
额定风速/m·s ⁻¹	12	永磁磁链/Wb	0.831
额定功率/kW	1.6	极对数	2

风力机的切入风速为 6 m/s, 额定风速为 12 m/s, 最大功率点跟踪的工作范围为风速 6~12 m/s 的情况。计算风速在 6~12 m/s 时, 风速每变化 0.5 m/s 时, 最优的 P_e^* 、 P_m^* 、 ω^* , 将 T_m^* 和 ω^* 的关系用线型拟合的方式表示出来, 替换常规最优转矩控制转矩与转速的关系, 从而实现最优 P_e^* 的跟踪。拟合曲线如图 2 所示。

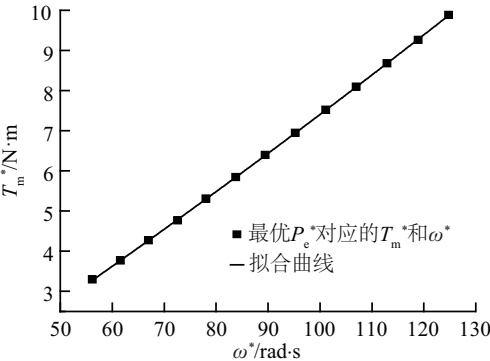


图 2 T_m^* 和 ω^* 的关系
Fig. 2 Relationship of T_m^* and ω^*

拟合公式由式(15)表示。

$$T_m^* = d_1 \omega^* - d_2 \quad (15)$$

式中, d_1 、 d_2 ——拟合曲线计算常量, $d_1 = 0.08199$, $d_2 = 1.5791$ 。

根据图 3 设计风电系统的控制, 发电机输出通过变流器整流给 100Ω , 3 kW 的耗能电阻负载供电, 系统输出电功率为电阻发热功率, 其中 U_{d^*} 、 U_{q^*} 为目标运动坐标系电压, U_{α^*} 、 U_{β^*} 为目标静止坐标系电压, S_a 、 S_b 、 S_c 为 SVPWM 控制的目标控制量。给定系统 MPPT 工作范围内的渐变风速, 对采用常规最优转矩控制与文中提出的改善后最优功率控制方法进行系统仿真。

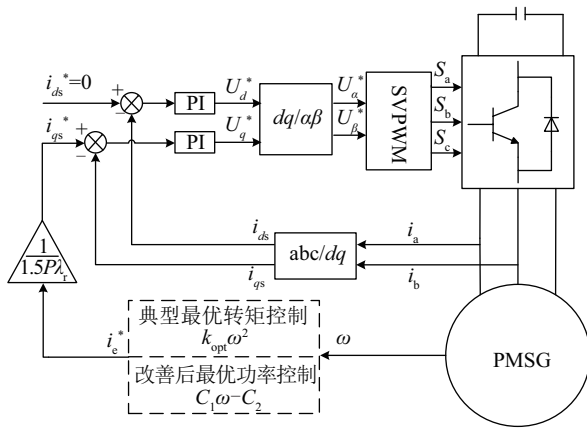
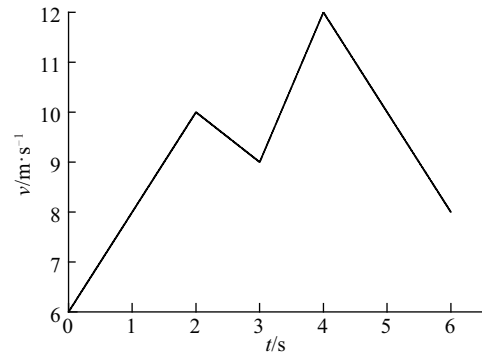


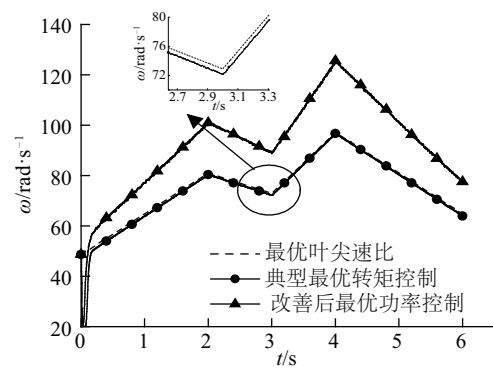
图 3 风电系统控制框图

Fig. 3 Control block of wind power system

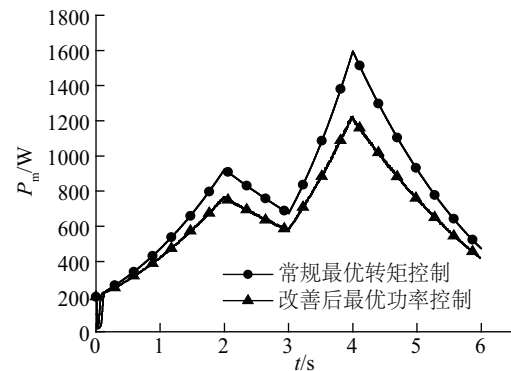
图 4a 给出了仿真中的风速波形, 为 $6 \sim 12 \text{ m/s}$ 风速区间的渐变风。图 4b、图 4c、图 4d 为常规最优转矩控制与改善后最优功率控制对比图, 从对比图中可看出, 改善后最优转矩控制能紧跟风速变化调节风力机的转速, 从而调节系统输出电功率, 继承了典型最优转矩控制跟踪速率快、鲁棒性强等优点。图 4b 中能看出常规最优转矩控制能把转速控制在风力机的最优叶尖速比附近, 而改善后最优功率控制的转速明显比最优叶尖速比情况的转速高, 同样风速情况下, 高转速能减小风力机的转矩, 降低发电机的三相电流, 从而降低发电机的铜耗, 以达到优化系统输出电功率的目的。图 4c 说明常规最优转矩控制风力机输出的轴功率比改善后的最优功率控制多, 但从图 4d 中可以看出, 在 MPPT 的风速控制区间内, 由于捕捉到的风能浪费在发电机的铜耗上, 常规最优转矩控制的输出电功率率明显比改善后最优功率控制低。



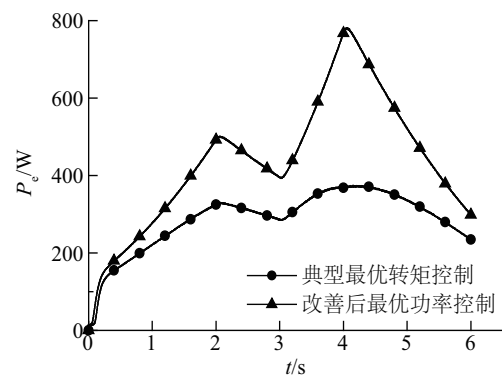
a. 风速曲线



b. 转速曲线



c. 风力机输出轴功率



d. 系统输出电功率

图 4 仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms

由此可见,改善后最优功率控制能够优化风电系统的电功率输出。

4 结 论

本文针对永磁直驱风力发电系统MPPT控制的问题,在考虑系统损耗基础上提出一种以系统输出电功率为参考量的新控制方法。通过Matlab/Simulink永磁同步发电系统仿真模型进行MPPT控制方法的验证,得到以下结论:

1)仿真数据结果表明,常规的最优转矩控制追求最大风能的捕捉,忽略了控制算法对系统损耗的影响,导致了系统中发电机的铜耗增加,系统输出电功率难以达到理论上的最大值,造成能量浪费。

2)通过对发电机铜耗的计算,能在控制算法上对风力机风能捕捉与系统损耗两方面进行综合考虑,制定以风电系统输出功率作为参考量的MPPT控制,有利于提升风电系统总体效率。从风电运营企业经济效益角度来说,该方法具有积极的意义。在实际风电系统运行中,风力机与发电机参数已知的情况下,无需作庞大的实验数据库,也能通过本文算法对常规最优转矩控制进行改善,提高风电系统的总体效率。

【参考文献】

- [1] 刘吉臻,孟洪民,胡 阳.采用梯度估计的风力发电系统最优转矩最大功率点追踪效率优化[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2367—2374.
- [1] Liu Jizhen, Meng Hongmin, Hu Yang. Efficiency optimization of optimum torque maximum power point tracking based on gradient approximation for wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2367—2374.
- [2] Kim Kyung Hyun, Van Tan Luong, Lee Dong Choon, et al. Maximum output power tracking control in variable-speed wind turbine systems considering rotor inertial power[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3207—3217.
- [3] Johnson K, Fingersh L J, Balas M, et al. Methods for increasing region 2 power capture on a variable speed HAWT [A]. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit[C], Reno, Nevada, 2004.
- [4] 陈家伟,陈 杰,龚春英.变速风力发电机组恒带宽最大功率跟踪控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(27):32—38.
- [4] Chen Jiawei, Chen Jie, Gong Chunying. A constant-bandwidth MPPT strategy for variable-speed WECS[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 32—38.
- [5] 韩 坤,李 军,李玉玲,等.基于模拟平台的永磁直驱风力发电MPPT新策略[J].太阳能学报,2010,31(11):1497—1502.
- [5] Han Kun, Li Jun, Li Yuling, et al. A novel control strategy of direct-drive PMSG wind generation MPPT based on experimental imitation platform[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(11): 1497—1502.
- [6] 单 超.双馈风力发电机控制系统半实物仿真平台设计[J].控制工程,2015,22(3):581—584.
- [6] Shan Chao. Design of semi-physical simulation platform of doubly fed wind power generator control system[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(3): 581—584.
- [7] 张 迪,魏艳君,侯兆云,等.基于直接功率控制双馈风电系统最大功率点跟踪[J].电力电子技术,2016,50(1):41—44.
- [7] Zhang Di, Wei Yanjun, Hou Zhaoyun, et al. Maximum power point tracking of doubly fed wind power generation system based on direct power control[J]. Power Electronics, 2016, 50(1): 41—44.
- [8] 朱 瑛,程 明,花 为,等.考虑损耗转矩的风力发电系统最大风能跟踪控制[J].中国电机工程学报,2013,33(19):39—46.
- [8] Zhu Ying, Cheng Ming, Hua Wei, et al. Maximum power point tracking control for wind energy conversion systems considering loss torque[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 39—46.
- [9] Choy Young Do, Han Byung Moon, Lee Jun Young, et al. Real-time hardware simulator for grid-tied pmsg wind power system[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2011, 6(3): 375—383.
- [10] 王群京,倪有源,朱卫国,等.新型汽车用爪极发电机系统效率计算[J].系统仿真学报,2006,18(6):1609—1611.
- [10] Wang Qunjing, Ni Youyuan, Zhu Weiguo, et al. Efficiency computation of an automotive claw-pole alternator system[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(6): 1609—1611.
- [11] Oh Ki-Yong, Lee Jae-Kyung, Bang Hyung-Joon, et al. Development of a 20 kW wind turbine simulator with similarities to a 3 MW wind turbine[J]. Renewable Energy, 2014, 62(3): 379—387.

RESEARCH ON A MPPT CONTROL METHOD FOR WIND POWER SYSTEM CONSIDERING LOSS

Zhao Yong, Feng Yanhui, Qiu Yingning

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper considers the loss of permanent magnet synchronous wind power system and designs the optimal power control method for optimizing the output electric power system. Building wind power system model in Matlab/Simulink software, the result shows that the new control method for optimizing the output electric power system have a better effect than conventional optimal torque control.

Keyword: wind power; MPPT; torque control; output electric power; Simulink