

永磁风力发电机直流并联及直流升压的仿真研究

王银涛^{1,2}, 何山^{1,2}, 王维庆^{1,2}, 王江涛³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049;

2. 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830049;

3. 北京三兴汽车有限公司, 北京 100070)

摘要: 针对分散式小型风力发电场, 实现永磁风电机组直流并联, 提出了永磁风力发电机 PWM 整流器直流侧并联的结构。为了能使小型风电场就近接入大型风电场或者并入电网时, 降低传输过程中输电损耗的目的, 采用了 DC-DC 升压组将直流母线电压升高的拓扑结构。为能够有效地实现发电机的并、切网, 设计了对发电机输出电压瞬时采样, 来判断发电机整流器侧是否连接到直流母线的断路器模型。基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了含 3 台永磁风力发电机、整流器、断路器和 DC-DC 升压组的仿真模型, 对永磁风力发电机在不同风速下的直流并联与升压进行了仿真分析。仿真结果表明, 在理想状态下, 该模型可实现不同风速下风力发电机的直流并联与升压。

关键词: 永磁直驱风力发电机; PWM 整流器; 直流母线; 并联; 直流升压

Abstract: Aiming at the scattered small wind power fields which realize the DC parallel connection of direct-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator (PMSG), the mathematical model is established that the connection of PWM rectifier of PMSG is parallel in DC side. In order to make small wind farm integrated with the nearest large wind farm or power grid and reduce the transmission loss in the process of more than ten kilometers far from the power grid, DC-DC chopper is used to rise the voltage of DC bus. In order to effectively realize the integration and cut off of generators, the instantaneous sampling of output voltage of wind turbine generator is designed to judge whether the rectifier side of wind turbine generator is connected to the short-circuit model of DC bus or not. Based on Matlab/Simulink simulation platform, the simulation model including three direct-driven wind turbines with PMSG, rectifier, circuit breaker and DC-DC boost group is established, and the simulation of DC in parallel and DC-DC boost under different wind speeds is analyzed. The simulation results show that the proposed model can realize DC in parallel and DC-DC boost of wind turbine generator under different wind speeds in the ideal condition.

Key words: direct-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator (PMSG); PWM rectifier; DC bus; parallel; DC-DC boost

中图分类号: TM315 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)04-0001-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.001

0 引言

中国陆地风力资源丰富, 风能作为一种洁净可再生能源, 在石油和煤日趋枯竭的情况下, 必将在未来取代传统能源, 在能源结构和环保方面起重要作用。国内使用的风力发电机主要有双馈和直驱永磁发电机, 而直驱永磁风力发电机较双馈机具有变速运行、变桨距调节、低转速、高效率和高功率因数等优点。此外, 直驱永磁风力发电机并网运行时, 无需从电网

中吸收无功功率建立磁场, 可以改善电网的功率因数^[1-2], 已经成为当今风力发电机研发的热点。

目前, 常见的风电传输是通过每台风力发电机连接变流器产生恒频的电能, 就近接入交流电网, 进行交流输电, 但风力发电具有较大的随机性和波动性, 交流并联在风机切、并网时, 对电网稳定运行有较大的影响^[3-4]。此外, 还有一种方式是把大规模风力发电接到换流站上进行高压直流输电^[4-7], 此种方法的优点是可以进行超长距离传输, 但是换流站的造价过于昂贵。

以上文献均是风力发电并网和输电的主要方式, 都有其自身的缺陷。目前文献中研究风力发电

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267017, 51367015); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题(20136501120003); 教育部创新团队(IRT1285)

机直流并联的情况,大多采用不同风力发电机同风速的情况进行仿真^[8]。下面以 1.5 MW 直驱永磁风力发电机为例,提出 3 台风力发电机在不同风速下,用整流器和直流升压斩波电路组进行直流并联和直流升压的结构,并在 Matlab/Simulink 仿真平台上进行了仿真。表 1 为 1.5 MW 直驱永磁发电机的基本参数。

表 1 直驱永磁风力发电机基本参数

额定功率 /WM	额定电压 /V	极数	相数	额定转速 /(r·min ⁻¹)
1.5	690	88	3	17.3

1 多机直流并联及 DC-DC 升压数学模型

1.1 系统结构框图

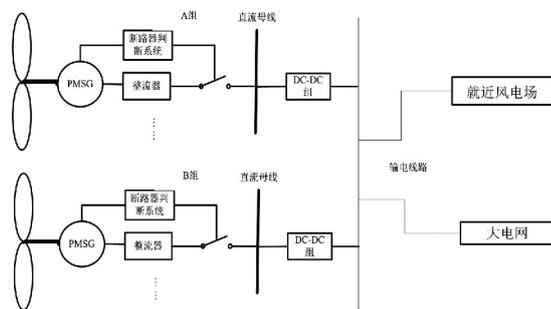


图 1 风力发电机组及 DC-DC 组结构简图

所提出的风力发电机直流并联及直流升压仿真系统,主要包括永磁直驱风力发电机组、整流器和 DC-DC 升压组,其基本结构如图 1 所示。由图 1 可知,直驱永磁风力发电机发出电能,通过 PWM 整流器整流,并对直驱永磁风力发电机的电压进行测量,当符合条件时 PWM 整流器的直流端并入直流母线,并且通过 DC-DC 升压组进行直流升压。

此种结构的优点在于:

1) 风力发电机交流转换成直流进行并联,无需考虑风力发电机交-直-交后恒频的问题。

2) 断路器判断系统采用的是对直驱永磁发电机的电压进行有效值采集。当发电机发出的交流电压有效值达到一定范围则断路器闭合;当不符合断路器闭合条件时,自动断开,这样可以缩短电压稳定的时间,使系统尽快稳定。

3) DC-DC 升压斩波电路组相对于换流站而言虽然输电距离较短,但是造价低,比较适用于小型风

力发电场短距离直流输电。

1.2 风力发电机风速-电压曲线

对于发电机有公式(1):

$$\begin{cases} n = \frac{60f}{p} \\ U = 4.44Nf\varphi \\ \lambda = \frac{wR}{v} \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为风力发电机转速; f 为频率; p 为极对数; N 为匝数; φ 为磁通; λ 为叶尖速比; R 为叶尖半径; w 为角速度; v 为风速。

由式(1)可以得到风力发电机输出的电压为

$$U = \frac{4.44N\Phi p\lambda v}{120\pi R} \quad (2)$$

而风力发电机捕获的风能为^[8-10]

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

式中: $C_p(\beta, r)$ 为风能利用系数,是桨距角 β 和叶尖速比 λ 的函数; ρ 为空气密度。

通过式(2)和式(3)对比得

$$\frac{U}{P_w} = \frac{4.44N\Phi\lambda}{60\pi^2R^3C_p(\beta, \lambda)v^3} \quad (4)$$

当风力发电机桨距角一定时,通过式(4)对比,由风力发电机最优功率曲线可得到风力发电机的风速-电压曲线,如图 2。

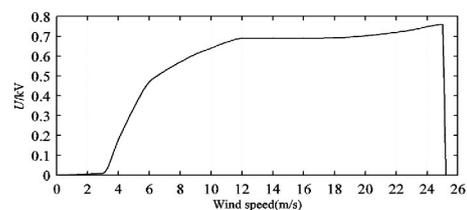


图 2 风力发电机的风速-电压曲线

1.3 断路器的动作判据

根据风速-电压曲线可知风机在风速 3 m/s 时开始输出电压,但是只有当电压达到 0.465 kV(风速 6 m/s)时,才能并入直流母线,而且当达到 0.76 kV(风速 25 m/s)时,为了保护设备必须把风机切除。

由于风力发电机的整流器并联到直流母线上时,直流侧电压恒定;当风力发电机的风速不符合并网条件时,为了能够有效地将风力发电机切除,设计了对风力发电机输出电压瞬时采集作为动作判据的模型,根据情况对断路器发出闭合或者断开的信号。假定风力发电机输出的三相电压值相同,故只采取

单相的电压瞬时值,系统采样时间 t 为 0.0001 s ,并假定在每个采样区间 $[t_1, t_2]$ 里,风力发电机的输出为正弦信号,其电压采样 U 的公式为

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_{t_1}^{t_2} \sin^2(2\pi ft) dx \right)} \quad (5)$$

断路器闭合和断开信号的判断公式为

$$S_n = \begin{cases} 1 & 0.465 < U < 0.76 \\ 0 & U < 0.465, U > 0.76 \end{cases} \quad (6)$$

即当断路器 S_n 信号为 1 时断路器闭合,风力发电机并入直流母线;而当断路器信号为 0 时,风力发电机从直流母线上切除。

1.4 PWM 整流器数学模型及其控制策略

PWM 整流器主要目标是控制变风速的风力机输出恒定的直流电压。因此,要实现恒定的直流电压,就必须及时调整风力机的转速大小,使其始终运行在最佳叶尖速比。

为了分析问题的方便,假设如下的条件:首先,忽略电容、电感的饱和,认为其是理想元件,忽略器件的损耗;其次,整流器 IGBT 的开关频率远远大于交流电网的频率^[11]。风力发电机三相整流器拓扑如图 3 所示。

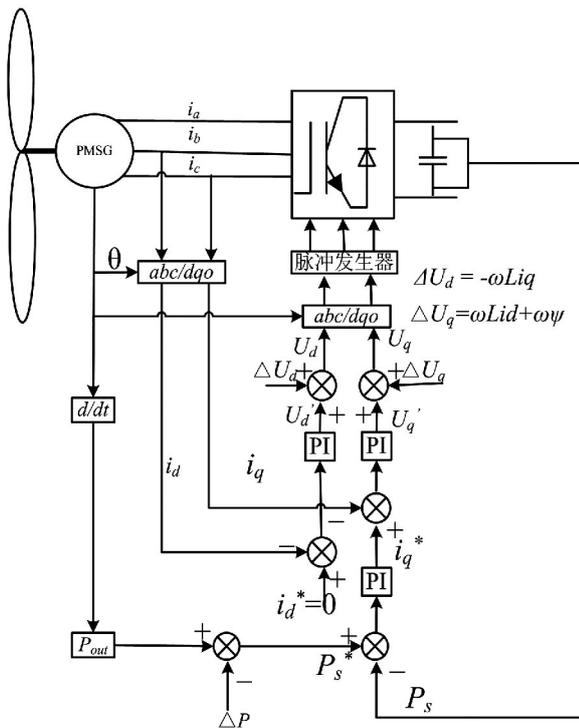


图3 三相整流器控制系统拓扑图

将 d 轴定于转子永磁体的磁链方向上,经过 $abc/dq0$ 坐标变换之后,得到电机定子电压方程为

$$\begin{cases} U_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q \\ U_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + \omega \varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中: L 和 R 分别为 PMSG 定子电感和电阻; ω 为同步电角速度; φ 为转子永磁体磁链; i_q, i_d 与 U_d, U_q 分别为定子电流与电压的 d, q 轴分量。

发电机的最佳有功功率给定值为

$$P_s^* = P_{out} - P_0 - P_{Cu} - P_{Fe} \quad (8)$$

式中: P_{Cu} 为铜损; P_{Fe} 为铁损; P_0 为风力机机械损耗。

如图 3 所示,整流器控制系统采用双闭环控制策略^[12]。外环为功率环,其 PI 输出量为 q 轴电流分量 i_q^* , d 轴电流分量 i_d^* 设为 0。内环为电流环, d, q 轴 PI 输出量加上耦合电压 ΔU_d 和 ΔU_q , 得到 d, q 轴控制电压分量 U_d 和 U_q , 再经 $abc/dq0$ 变换后得到三相输入电压参考信号,最后通过脉冲发生器产生驱动信号去控制整流器开关管的开关状态。

此种控制结构的优点在于:不但可以控制直流母线电压恒定、交流侧输入电流实现正弦化和单位功率因数运行,而且还可以获得更好的稳态性能和更快的动态响应速度。

1.5 DC-DC 直流升压组模型

目前,风力发电直流传输大多采用换流站进行直流传输,优点是传输距离远、损耗相对较小,但是造价过于昂贵,并不适用于离电网较远的小型风力发电场的直流传输。

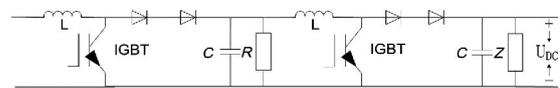


图4 DC-DC 斩波电路拓扑结构图

于是提出了用 DC-DC 升压组来代替换流站^[13-14],既达到了直流传输的目的,又节省了直流升压过程中的造价成本。因为整流器是可控型,所以所设计的 DC-DC 组无需加 PI 控制即可达到要求的电压,其拓扑结构图如图 4 所示。

2 系统仿真及分析

在 Matlab/Simulink 中搭建了 1 组 3 台永磁风力发电机组、整流器、断路器和升压组模型,针对不同

风机在不同风速下的整流电压的输出、风力发电机投切和DC-DC电压的输出情况进行仿真。系统主要参数如表2所示。

表2 仿真系统主要参数

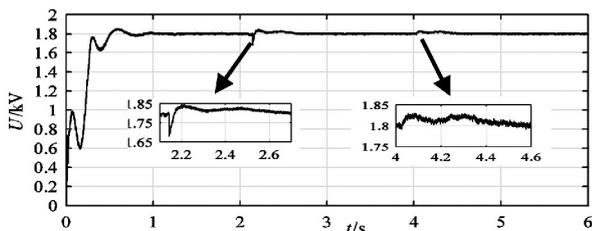
设备名称	技术参数
风力发电机	额定风速 12 m/s, 额定功率 1.5 MW, 额定电压 0.69 kV, 风速-电压曲线见图2
整流器	直流电容值 4 500 μ F, 直流电压稳定值 1.8 kV
DC-DC组	电感值 180 mH, 电容值 1 000 μ F, 直流电压稳定值 9 kV

根据风电场的实际情况, 风速是变化的, 并且每台风力发电机所受到的风速也不相同, 为便于仿真, 每台风力发电机不同时刻受到的风速如表3所示。

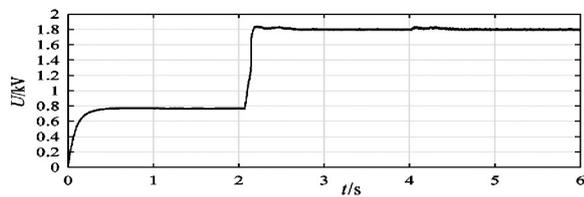
表3 不同时刻的风速(m/s)

时间	1~2 s	2~4 s	4~6 s
第1台	12	14	10
第2台	4	8	12
第3台	14	16	25

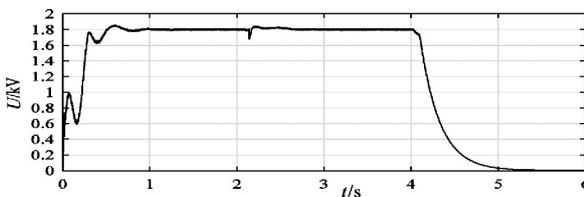
根据表3中的不同时刻风速情况, 并通过 Simulink 仿真得到3台直驱风力发电机的整流器直流侧输出电压结果如图5所示, DC-DC升压组电压输出如图6所示。



(a) 第1台(与母线电压相同)



(b) 第2台



(c) 第3台

图5 3台风力发电机整流图

此次仿真中, 当风速超过 25 m/s 时将风力发电机切出; 当风速符合要求时, 就迅速并网, 以缩短稳

定时间。

第1台和第3台风力发电机在 0~1 s 时, 风速由 0 m/s 增至 12 m/s 和 14 m/s, 其整流电压稳定值可达到 1.8 kV, 用于建立母线和 DC-DC 升压组输出电压, 并将此电压值作为 1~6 s 稳定电压参考值, 由图 5(a) 可知母线电压稳定时间为 1 s, 由图 6 可知 DC-DC 升压组电压稳定时间为 1.5 s。

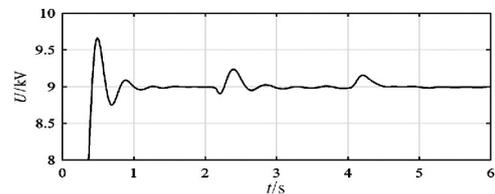


图6 DC-DC升压组电压输出图

由图 5(a) 和 (b) 中可以看出, 当第2台风机在第2 s 时风速由 4 m/s 增为 8 m/s, 达到并入电网风速(6 m/s) 条件, 风机并入直流母线, 引起直流母线电压波动为 -6% ~ 3%, 通过 PWM 整流器中积分调节环节, 电压稳定时间为 0.5 s, 而 DC-DC 输出电压的波动为 -1% ~ 3%, 稳定时间为 0.7 s。

由图 5(a) 和 (c) 中可以看出, 当第3台风机在第4 s 时风速由 16 m/s 增为 25 m/s, 达到了风机运行的极限风速(25 m/s), 为了保护设备必须把风机切除, 风机切出, 引起直流母线电压的波动为 -1% ~ 2%, 通过 PWM 整流器中积分调节, 稳定时间 0.5 s, 引起 DC-DC 输出电压的波动为 +2%, 稳定时间 0.6 s, 风机切出后其所产生的能量由整流器直流侧电阻消耗, 电压衰减时间为 1.5 s。

由以上分析可知: 切机和并网对直流母线电压和 DC-DC 输出电压的影响基本相同, 且在直流母线对电压波动的要求范围内。

对直流母线电压进行 FFT 分析, 如图 7 所示。根据傅里叶级数分析, 三相桥式全控整流电路直流侧输出电压中主要含有 $6k$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 次谐波, 且 6 次谐波的幅值最大, 这里直流母线电压主要含 6 次、12 次、18 次谐波, 且 6 次谐波的幅值最大。

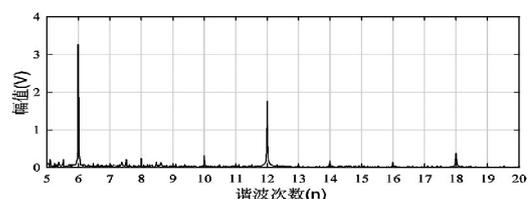


图7 直流母线谐波分析图

DC-DC 升压组输出电压进行 FFT 分析如图 8

所示。其电压主要含20次、40次谐波,且20次谐波的幅值最大。由前面可知母线的电压谐波次数为6、12和18,经过DC-DC升压组其谐波幅值均降低了,说明DC-DC升压组不仅有升压的作用,还对谐波有抑制和滤波作用。

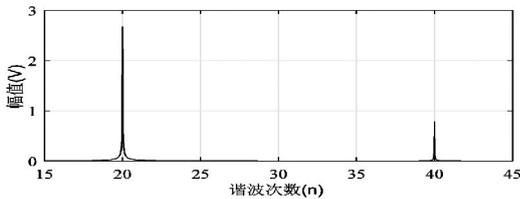


图8 DC-DC升压组谐波分析图

3 结论

分析了3台直驱永磁风力发电机,在不同风速下直流并联及DC-DC斩波电路组升压的可行性,搭建基于双闭环控制策略的PWM整流器的模型,并提出了两组DC-DC直流升压斩波电路串联用于直流升压的模型。仿真结果表明:

- 1) 风力发电机直流并联模块仿真系统能够实现3台风力发电机在不同风速下的直流并联;
- 2) 切机相对并网引起直流母线和DC-DC升压斩波电路组的电压波动超调量要大,但二者调节时间基本相同;
- 3) DC-DC直流升压斩波电路组可以实现升压,且谐波的幅值相对于直流母线的谐波幅值有所减小。

参考文献

[1] 薛玉石,韩力,李辉,等.直驱永磁同步风力发电机组研究现状与发展前景[J].电机与控制应用,2008,35(4):1-5.

[2] 尹明,李庚银,张建成,等.直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J].电网技术,2007,31(15):61-65.

[3] 党向东.风力发电机组并网运行研究[D].保定:华北电力大学,2010.

[4] 程启明,程尹曼,汪明娟,等.风力发电机组并网技术研究综述[J].华东电力,2011,39(2):239-245.

[5] 薛英林,吴方劫,张涛,等.基于PSCAD/EMTDC的多端柔性直流输电系统并行仿真计算[J].电力建设,2016,37(2):10-17.

[6] 吕敬,施刚,蔡旭,等.大型风电场经VSC-HVDC交直流并联系统并网的运行控制策略[J].电网技术,2015,39(3):639-646.

[7] Liang Haifeng, Li Gengyin, Wang Song, et al. VSC-HVDC Control System Framework [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 141-147.

[8] 严干贵,刘吉刚,穆钢,等.基于PSCAD/EMTDC的直驱永磁同步风力发电机多机并联运行仿真[J].电力系统保护与控制,2011,39(7):67-73.

[9] 姚骏,廖勇,瞿兴鸿,等.直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J].电网技术,2008,32(10):11-15.

[10] Erdem Ergin, Shi Jing, Peng, et al. Short-term Forecasting of Wind Speed and Power——A Clustering Approach [C]//2014 IIE Annual Conference and Expo. US: IIE, 2014: 3501-3508.

[11] 张婷婷,吴新开,刘洋,等.直驱式永磁风力发电机侧PWM整流器的建模与仿真[J].电气传动自动化,2012,35(1):35-39.

[12] 邓文浪,陈勇奇,郭有贵,等.基于RMC和VSC的海上风电混合多端-HVDC系统[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(8):01-07.

[13] 谷鑫.直驱式永磁风力发电系统Boost斩波-三电平变换器控制[D].天津:天津大学,2010.

[14] 陈勇奇.基于RMC的海上风电并联多端高压直流输电研究[D].湘潭:湘潭大学,2014.

作者简介:

王银涛(1990),硕士研究生,研究方向为可再生能源及其控制技术;

何山(1974),副教授、硕士生导师,研究方向为可再生能源及其控制技术;

王维庆(1959),教授、博士生导师,从事电力系统及可再生能源的研究工作。

(收稿日期:2016-06-04)

欢迎订阅 欢迎投稿