基于直流电网的非并网风电系统及其控制策略

陈 杰,张先进,龚春英,严仰光

(南京航空航天大学自动化学院,江苏省南京市 210016)

摘要:大规模非并网风力发电理论避开了风电并网的技术难题。文中针对大规模非并网风电系统,采用一种基于直流电网的系统结构,具有能量转换过程少、结构简单、损耗低和可靠性高等优点。针对文中所述的直流电网,提出了电压分级控制策略,该控制策略不仅可以保证低风速时用电负载的正常运行要求,而且大大降低了风电系统与电网的功率交换,减小了风电对电网的影响。用 Saber 软件建立了仿真模型,仿真结果验证了文中提出的基于直流电网的非并网风电系统及其功率控制策略的可行性。

关键词:非并网风力发电;直流电网;直流变压器;控制策略 中图分类号:TM614;TM76

0 引言

风能作为一种绿色的可再生能源,因为技术优势和资源丰富,受到了广泛关注和深入研究^[1-6]。但是,风能具有不稳定性和间歇性的特征,随着风电在电网中占有率的不断增长,对电网的稳定和电能质量造成严重的威胁。国内外研究人员提出了许多方案,试图克服风电并网的技术障碍,但目前都限于对问题的改善,并没有解决问题的根源,风电对电网的贡献难以超过 1/10 已成为一个世界性的难题。

大规模非并网风电理论的提出,给风电在全球 范围内的快速发展提出了一条新的道路[7-8]。所谓 非并网风电,简言之,即风电系统的终端负载不再是 单一的电网,主要负载是一系列能适应风电特性的 高耗能产业及其他特殊领域,如以电解铝为重点的 有色冶金工业、氯碱工业、大规模海水淡化、制氢等, 是对现有"并网"和"离网"风电针对一系列能适应风 电特性的特定负载的优化结合。文献[9-10]针对风 电场合提出了直流电网的概念,它不需要研究频率 和相位控制等技术,系统无功损耗小,效率和可靠性 高。但文献[9]的终端负载仍是单一的电网,终端控 制相对简单。而对于大规模非并网系统,其负载终 端是高耗能负载、储能装置和并网变换器等的组合, 系统功率控制更加复杂。文献[10]主要研究了如何 抑制系统的电压尖峰和电压升高问题,但负载与电 网无关,属于离网型风电系统。

收稿日期: 2009-01-07; 修回日期: 2009-03-08。 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目 (2007CB210303)。

— 86 —

本文针对具有多终端负载的大规模非并网风电 系统,采用直流电网的系统架构,分析了几种适合于 不同场合和不同功率等级的基于直流电网的大容量 非并网系统方案,具有结构简单、能量转换过程少等 优点。同时,针对非并网风电系统,提出了电压分级 控制策略,不仅实现高耗能负载、储能装置和并网变 换器等多个终端负载的功率协调控制,而且还大大 降低了风电系统与电网的功率交换。

1 系统结构

图 1 给出了基于直流电网非并网风电系统的基本结构,它是由多台风力发电机组及其控制系统组成的风电场、直流输电系统、高耗能终端负载、储能系统、交流电网接口、控制系统和通信线路等构成的一个辐射状多端直流系统。各台风力发电机组按最大功率跟踪(MPPT)控制与电网相连,独立向电网送电;高耗能负载是系统最主要的用电负荷,就近吸收绝大部分的风电能量;储能设备主要负责快速提供或吸收波动的电能,起能量缓冲功能;交流电网接口主要用以向电网馈送过剩的电能,同时也为高耗能负载的安全运行提供保障,如电解槽的保温等。





与采用交流输电相比,基于直流电网的系统结 构具有结构简单、能量变换环节少、可靠性高等优 点。

在图 1 给出的基本结构中,发电机输出仅经过 整流便进行传输,输电母线的电压相对较低,通常在 DC 5 kV~10 kV之间。而对于大容量非并网风电 系统,尤其是大规模海上风电场,系统的容量不断增 大,传输距离增长,需要考虑采用高压直流输电方 案。亦即,将风机整流后的中压直流电通过大功率 直流变压器抬升至上百千伏的高压直流电,再进行 远距离传输,可以有效降低输电损耗。根据直流变 压器安装位置的不同,可以有 2 种结构:集中升压结 构和分布式升压结构。

集中升压结构是指风电场的多台风机先通过集 线网络收集各台风机的功率,通过一个升压变压器 抬升电压后再进行高压直流输电。直流变压器的安 装位置如图 1 中的 *B* 点所示。该结构的优点是系 统效率高,而且风机端的设备较少,只要安装一台 AC/DC 脉宽调制(PWM)整流器即可,风机的安装 和维护相对比较方便。但是,大功率集中升压变换 器的存在使得系统的可靠性受到限制,系统的可靠 性不可能高于升压变换器的可靠性。

分布式升压结构是将集中升压变换器分散配置 到每台风机之后(如图 1 中的 A 点),各台风机就近 经过升压之后接入高压输电网络,直接将能量送到 终端负载。这样,虽然升压变换器的效率有所降低, 但是由于风机输出电压较高,传输损耗得到有效减 小。另外,分布式升压结构便于实现系统的冗余运 行,系统可靠性得到大幅度提升。而且,系统容量扩 展灵活,不受集中升压变换器的功率限制。该结构 比较适合于单台风机容量较大的中大规模风电场。

2 系统功率控制

非并 网 风 电 系 统 的 控 制 可 以 分 成 风 力 机 MPPT 控制和多端系统的功率协调控制两部分。

2.1 风力机 MPPT 控制

相对系统级的控制,风力机 MPPT 控制属于底 层控制,主要负责风力机的最大功率跟踪、安全运行 和上层控制系统发出的停复机指令等。目前对于风 力机 MPPT 控制研究较多,主要算法有以下几种: 风速闭环控制、转速闭环控制、爬山法控制和智能控 制。本文不对其深入分析,将研究重点放在系统的 功率分配和控制上。

2.2 系统功率控制 所谓系统功率控制,是指由风电场、输电网络、 高耗能终端负载、储能设备和并网变流器等构成的 多端复杂系统的功率的协调管理和合理分配。

对于非并网风电系统,功率控制的根本出发点 是希望高耗能负载尽可能多地使用风能,从而最大 限度地减少与电网的功率交换,降低风电对电网的 影响。但是由于风能的随机性和波动性,使得高耗 能负载又必须要有电网接口,以维持设备正常运行 的功率要求。为此,针对非并网风电的多端复杂结 构,提出了基于母线电压分段控制的系统协调控制 策略。图2给出了电压分段控制示意图,根据母线 电压工作点的不同,可以分成5种工作状态。



1) 工作状态 1(U_{BUS} = U)

在该工作状态下,风机发出的功率在高耗能负载正常安全生产所需的功率范围内。此时负载吸收 风电机组发出的全部功率,储能设备和并网变流器 待机运行,负载变换器闭环工作,直流母线电压稳定 在 *U* 附近。

2) 工作状态 $2(U_{BUS} = U_a)$

如果在某一时刻风速较低,风力机组发出的功 率无法满足负载正常运行的最低要求,而负载为了 满足安全生产的需要维持一定的下限功率,此时注 入母线的功率小于输出的功率,母线电压会下降。 当电压降至 U_a时储能设备启动工作,为负载提供 缺少的功率。只要发电和用电功率差在储能设备的 额定功率范围以内,储能设备的双向变换器可以闭 环运行,维持母线在 U_a不变。

3) 工作状态 3(U_{BUS} = U_L)

如果风能长时间不足,导致储能设备过放电进入停机保护状态,或者系统的发电和用电功率差值 大于储能设备的额定功率,此时母线电压会因为功 率不平衡而进一步下降。当达到低电压门限 UL 时,并网变流器启动工作,给负载提供正常运行所需 的功率。对于合理选址的风电场,该工作状态出现 的概率较低。

4) 工作状态 $4(U_{BUS} = U_b)$

与工作状态2相反,在高风速时,风机发出的功 率可能超过负载的最大用电量,那么输入母线的功 率将大于输出的功率,母线电压升高。当电压等于

- 87 -

Ub 时储能设备启动工作,吸收多余的风能,并且双 向变换器的电压基准也发生变化,只要发电和用电 功率差在储能设备的额定功率范围以内,就可以将 母线电压维持在 Ub。

5) 工作状态 5(U_{BUS} = U_H)

因为储能设备的容量有限,长时间的高风速会 使得储能设备进入饱和,或者系统瞬时的功率差(输 入功率减去输出功率)超过储能设备的额定功率,此 时系统失去功率平衡,母线电压进一步升高,并在达 到上限电压 U_H时启动并网变流器,将多余的能量 送入电网,避免因母线电压过高而损坏设备。

可见,采用电压分段控制方法,可以尽可能减小 风电与电网的能量交换,避免大容量风电场接入电 网带来的电能质量和稳定性下降的技术难题。另 外,通过风电场和负载用电功率的合理匹配,甚至可 以不向电网提供任何能量,即没有工作状态4和5。 当然,负载的具体运行情况会随风电场的选址不同 而有很大差异,因此根据风电场选址的情况,需要合 理配置风电场和负载的额定功率,在保证负载尽量 高负荷运行的同时,也要尽可能减小风电与电网的 功率交换。

附录 A 图 A1 以储能设备的控制为例,给出了 相应的控制框图。储能设备会根据母线电压情况选 择所需的电压基准和电流基准。当母线电压高于 5.5 kV 时,以 U_a 为电压基准;相反,当母线电压低 于 4.5 kV 时,则以 U_b 为电压基准。对于电流环, 当母线电压在 U_a 与 U_b 之间时,电流基准为0,即充 放电电流为0;而当电压不在 U_a 与 U_b 之间时,控制 电路会自动选择电压环的输出作为电流环的基准给 定。

3 仿真分析

为了验证上文提出的基于直流电网结构的非并 网风电系统以及母线电压分段控制策略的可行性和 正确性,利用 Saber 仿真软件进了仿真验证,仿真模 型见附录 A 图 A2。仿真参数如下:直流母线额定 电压 5 kV,储能设备启动电压 4.5 kV/5.5 kV,并 网变流器启动电压 4 kV/6 kV,风机额定功率 500 kW,高耗能负载额定功率 400 kW,高耗能负载 最小功率限制 85 kW,储能设备额定功率50 kW,并 网变流器额定功率 100 kW。

3.1 仿真模型

- 88 -

1) 风机侧模型

根据前文给出的系统结构,永磁同步电机需要 配三相 AC/DC 全功率变流器,用于实现风机的变 速运行和最大功率跟踪。为了便于仿真实现,采用 一个电流控制 Boost 变换器来模拟风机和 AC/DC 变流器。

2) 高耗能负载仿真模型

给高耗能负载供电的变换器通常是输出电流控制的 Buck 电路,电流的基准根据母线电压的闭环 自动给定,考虑到负载的功率限制(本文按风电场额 定容量的 4/5 左右进行设计),变换器输出功率有一 个上限值。另外,为保证电解铝等高耗能负载安全 生产,需要有一个最低功率要求,因此,变流器的输 出功率也有一个最低限制。

3) 储能单元仿真模型

储能单元采用一个双向 Buck 变换器和蓄电池 模块。采用电压电流双闭环控制,可以实现恒压限 流控制。由于双向变换器工作于升压模式时等效为 Boost 电路,存在右半平面零点,若采用经典的 PI 调节器容易出现振荡。仿真中根据系统的具体参数 选取 PID 调节器,并对其参数进行优化设计,具体 设计过程可参考文献[11]。

4) 并网变流器仿真模型

由于系统比较复杂,为了尽量减少开关元件,提 高仿真速度。模型中的并网变流器采用单相桥式拓 扑结构。

3.2 结果分析

基于图 1 所示的系统结构和本文提出的电压分 段控制策略,分别对中等风速到高风速和中等风速 到低风速 2 种突变情况以及控制逻辑进行了仿真验 证。

图 3 给出了从中等风速到高风速变化时的仿真 波形。



在 T₁时刻风速突然上升,此时风机吸收的功 率增大并超过高耗能负载的最大功率,剩余功率会 造成母线电压上升,在电压达到 5.5 kV时,储能装 置启动工作,吸收多余的风能。在 T₂时刻,若风速 进一步上升,风机吸收的功率也再次增大,此时风机 吸收的功率约为 500 kW,而负载的功率维持在最大 值 400 kW。即使考虑传输损耗,储能装置也无法吸 收系统输入、输出的功率差,此时母线电压将进一步 上升,到 6 kV时并网逆变器开始工作,将多出的功 率馈入电网。因为储能装置的容量有限,假设在 T₃ 时刻储能装置饱和,此时储能装置无法停止工作,多 余的功率将全部由并网变流器送入电网。

相反,图 4 给出的是从中等风速到低风速变化 时的仿真波形。



Fig. 4 Simulation waveforms under low wind speed

在 T₄ 时刻风速突然降低,此时风机吸收的功 率减小(从 250 kW 下降至 50 kW),假设负载正常 运行所需的最低功率约 85 kW,则输入设备不足以 提供高耗能负载所需的功率,负功率差会导致母线 电压跌落,当电压跌至 4.5 kV 时,储能设备启动工 作,共同为负载提供缺少的功率,母线电压维持在 4.5 kV 不变。T₅ 时刻,若风速进一步减小,此时风 机停止工作,而高耗能负载仍需要维持正常运行的 最低功率要求,储能装置以最大输出电流工作,但仍 无法满足负载的功率需求,负功率差会使母线电压 再次跌落,当电压跌落至 4 kV 时,并网逆变器会启 动工作,与储能设备共同为高耗能负载供电。若风 机长时间停止工作,受容量的限制,经过一段时间后 储能设备会因为放电完毕而停止工作,此时将由电 网单独为高耗能负载提供功率,对应图 4 的 T₆ 时

2

刻。但此时负载运行在最小功率限制状态,电网提 供的功率通常不到风机额定功率的20%。

而对于一个合理选址的风电场,风机通常很少 工作于额定功率或者停机的状态,因此并网变流器 实际运行的时间很短。换言之,非并网风电系统真 正与电网交换的能量很少,通常最大也不超过额定 功率的 20 % (此数据随系统的配置不同会有所变 化)。

可见,采用非并网方式,通过基于母线电压分段 控制策略,可以使绝大部分的风能直接为高耗能负 载供电,仅有很少一部分送入电网或者由电网提供 少量的功率,具体比例将视系统的配置有所不同。

为了验证附录 A 图 A1 所示控制框图的可行性 和正确性,图 5 给出了从高风速突变到低风速时储 能设备充放电电流、储能设备双向变换器的电压基 准以及母线电压对应的变化情况。根据电压基准和 充放电电流波形可以看出,采用滞环控制可以根据 母线电压的变化情况自动调整电压和电流基准。



图 5 风速从高到低突变的部分波形 Fig. 5 Waveforms from high wind speed step to low speed

4 结语

大容量风电并网会给电网的电能质量和电力系 统的稳定性构成威胁。非并网风力发电系统向高耗 能负载直接供电,与电网仅有很少的功率交换。针 对非并网系统,本文采用直流电网的方案,具有结构 简单、效率高、可扩展性强等特点。针对直流电网提 出了一种新型的基于母线电压的分段控制策略,可 以实现非并网系统多个终端负载的功率协调控制。 仿真结果显示,采用电压分段控制策略的非并网风 电系统与电网的功率交换仅占系统额定功率的一小 部分。

- 89

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

参 考 文 献

- Global Wind Energy Council. Global wind 2007 report. 2nd ed [R/OL]. [2009-01-01]. http://www.gwec.net.
- [2] LIN Fei, MA Zhiwen, YOU Xiaojie, et al. The grid connected converter control of multi-terminal DC system for wind farms// Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems: Vol 2, September 29, 2005, Nanjing, China:1021-1023.
- [3] 丁明,包敏,吴红斌,等.复合能源分布式发电系统的机组组合问题.电力系统自动化,2008,32(6):46-50.
 DING Ming, BAO Min, WU Hongbin, et al. Unit commitment problem in distributed generation system with multiple energy sources. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 46-50.
- [4] 王成山,孙玮,王兴刚. 含大型风电场的电力系统最大输电能力 计算. 电力系统自动化,2007,32(2):17-21.
 WANG Chengshan, SUN Wei, WANG Xinggang. Total transfer capability calculation of power system including largescale wind farm. Automation of Electric Power Systems, 2007, 32(2):17-21.
- [5] 常勇,徐政,郑玉平.大型风电场接入系统方式的仿真比较.电力 系统自动化,2007,31(14):70-74.

CHANG Yong, XU Zheng, ZHENG Yuping. A comparison of the integration of large wind farm. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 70-74.

 [6] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响.电力系统 自动化,2001,25(6):53-56.
 LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distribution generation and its impact on power systems. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 53-56.

- [7] 顾为东. 中国风电产业发展新战略与风电非并网理论. 北京:化 学工业出版社,2006.
- [8] 顾为东.大规模非并网风电系统开发与应用.电力系统自动化, 2008,32(19):1-9.

GU Weidong. Development and application of large-scale nongrid-connected wind power system. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 1-9.

- [9] MEYER C, HÖING M, PETERSON A, et al. Control and design of DC grids for offshore wind farms. IEEE Trans on Industrial Applications, 2007, 43(6): 1475-1482.
- [10] 张先进,陈杰,龚春英.非并网风力发电系统的电压协调控制.
 电力系统自动化,2008,32(22):91-93.
 ZHANG Xianjin, CHEN Jie, CONG Chunying. Coordinated

control of voltage in wind power system without grid connection. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 91-93.

[11] 张方华,朱成花,严仰光.双向 DC - DC 变换器的控制模型.中 国电机工程学报,2005,25(11):46-49.
ZHANG Fanghua, ZHU Chenghua, YAN Yangguang. The controlled model of bi-directional DC-DC converter.
Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 46-49.

陈 杰(1982 → ,男,通信作者,博士研究生,主要研究 方向:风力发电技术和变流技术。E-mail: nuaachenjie @ 163.com

张先进(1975 →),男,博士研究生,讲师,主要研究方向: 风力发电技术和功率电子技术。

龚春英(1965 → ,女,教授,博士生导师,主要研究方向: 风力发电技术和功率电子变换技术。

DC Grid Based Non-grid-connected Wind Power System and Its Control Strategy

CHEN Jie, ZHANG Xianjin, GONG Chunying, YAN Yangguang

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract : Lager scale non-grid-connection wind power theory avoids the technical issue of integrating wind power into utility. This paper introduces a novel system structure based on the DC grid for the large scale non-grid-connection wind power application. The system is especially suitable for the wind power generation system where full power conversion and high energy consumptive DC load is used. The proposed system has the merits of less power conversion train, simple structure, low power losses and high reliability. Then, a bus voltage step control strategy is proposed for the DC micro-grid system. By using the control strategy, not only the normal operation requirement of terminal devices is guaranteed, but also the power exchange between wind power system and utility is minimized. Finally, a system model is established with Saber simulator, and the simulation results verify the feasibility of the proposed system and its power control strategy.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2007CB210303).

Key words: non-grid-connected wind power; DC micro-grid; DC transformer; control strategy

90 -