

电力电子技术在风力发电中的应用综述

王 琦¹, 陈小虎², 吴正伟³

(1 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042

2 南京工程学院 电力工程系, 江苏 南京 210013

3 南瑞继保有限公司, 江苏 南京 211100)

[摘要] 风能是不能储存能源, 将风能转换成电能并输送到电网过程中, 电力电子设备是关键因素之一. 介绍了当前主要的风力发电机系统及其控制. 针对最具有发展潜力的变速恒频双馈风力发电系统, 分析其用于转速控制的电力电子变换器装置. 分析了交流并网安装静止无功补偿器的意义, 介绍了基于 VSC 的轻型直流输电原理. 最后, 描述了未来大容量海上风电场将更广泛应用电力电子装置.

[关键词] 风力发电机系统, 电力电子变换器, 静止无功补偿器, 轻型直流输电, 海上风电场

[中图分类号] TM 614 [文献标识码] A, [文章编号] 1672-1292(2005)04-0007-04

Summ arization of Pow er Electronics Techniq ues in W ind Pow er

W ANG Q i, CHEN X iaohu², WU Zhengwei¹

(1 School of Electrical and Automation Engineering Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210042, China

2 Department of Electrical Engineering Nanjing Institute of Technology, Jiangsu Nanjing 210013, China

3 Nari-relays Electric Co., LTD, Jiangsu Nanjing 211100, China)

Abstract Since the wind is non-storable energy source, the power electronics device is one of the key factors during the period of the wind transferred into the electric energy and transmitted to the power network. In this paper, the main wind generator systems existing and their controls are introduced. To the most potential variable-speed constant-frequency doubly fed induction generator, the device of power electronics converter used to control rotate speed is analyzed. The significance of installation of Static Var Compensator in AC connections to the grid is analyzed. The principle of high voltage direct current transmission light based on VSC is analyzed. Finally, it is described that the power electronics device will be applied widely in large-scale offshore wind farm in the future.

Key words wind generator systems, power electronics converter, static var compensator, HVDC light, offshore wind farm

0 引言

风力发电技术越来越受到世界各国的高度重视. 2003 年, 全球风力发电装机容量达 32 000 MW, 我国风力发电过去 10 年以年均 55% 的高速增长, 到 2010 年风电装机总容量可达 400 万 kW 以上. 风力发电的优势有: (1) 成本低, 可以与核能、煤和燃气在对等的规则下竞争. (2) 其动力是免费的、充裕的, 且取之不尽, 用之不竭. (3) 不需要燃料, 不会排放 CO₂. (4) 组合式设计, 可以迅速

安装. (5) 不妨碍土地的使用, 工业和农业活动可以继续 在塔架周围进行^[1].

从 20 年前推出的样机开始, 风电技术经过长期发展的历程, 今天的发电机组已经成为先进的现代高新技术. 当前一台风电机组, 比 20 年前的机组功率大 200 倍, 现代的风电发电厂生产出来的电量之大, 相当于常规电厂. 要以最低的成本生产出最多的电能, 风力发电系统正在不断的改进, 其中电力电子设备起到关键作用. 目前, 电力电子设备广泛应用在大、中、小容量的风力发电系统中^[1].

收稿日期: 2005-05-18

作者简介: 王 琦(1975-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事电力电子在电力系统中应用和风力发电等方面的教学与研究.

E-mail wangq@njjnu.edu.cn

1 风力发电机系统

由于简易性以及鲁棒性,失速或者主动失速控制的定速风力发电机系统是 2003 年以前最常见的系统,该系统的主要结构如图 1 所示.主动失速控制主要运用在额定功率超过 1MW 的大机组,其标准组成是一个齿轮变速箱和无功补偿电容器组.但是此系统也有一定的缺点,例如输出功率高度不稳定性及其在变速箱的消耗.

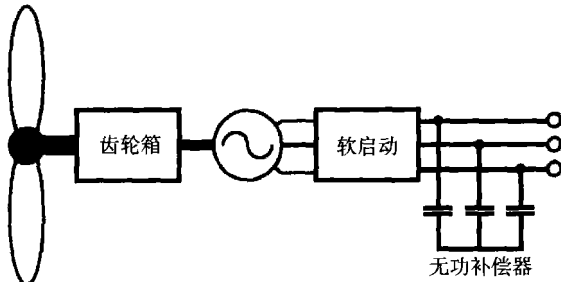


图 1 定速风力发电机系统

当定速风力发电机系统的缺点被描述出来后,开始倾向于使用变速恒频风力发电机系统,它的优点在于:

- (1) 变速运行放宽对桨距调节响应速度的要求,降低桨距调节系统的复杂性.变速恒频风力发电机系统可以和当时风速相协调控制,即:低风速时桨距角固定,高风速时调节桨距角限制最大输出功率.
- (2) 变速恒频风力发电机可以减小低风速下的空气动力干扰,使噪声降低.
- (3) 变速恒频风力发电机以最佳的叶尖速比、最大的功率点运行,提高了风力机的运行效率.
- (4) 变速恒频风力发电机系统可以减少转矩脉动,从而减少了输出功率的波动.
- (5) 变速恒频风力发电机可以减少叶片和驱动轴上机械应力.

目前,拥有双馈感应电机的变速恒频变桨距调节系统(DFIG)非常流行,在风力发电机系统中将占有重要的地位.它与定速风力发电机系统相比,节省了静止无功补偿器,可以获取更多的电能和提高电网电能质量.图 2 为此系统的主要结构.

由多个电力电子变换器和一个多极同步电机的变速变桨距调节系统在目前也很普遍,图 3 为此系统的主要结构.在文献[2]中提到,由于其能够忽略变速箱,因此,它的结构很有吸引力.除此之外,也存在一些使用单个变速器和多个电力电子变换器的感应电机系统,但是其使用范围不广.

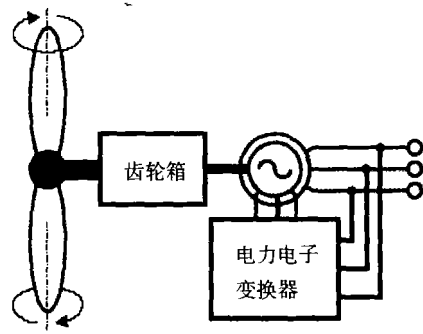


图 2 变桨距变速双馈感应机系统

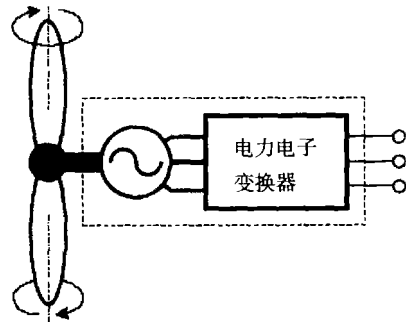


图 3 变桨距变速直接驱动同步机系统

1.1 功率控制

传统风力机一般采用定桨距失速调节定速风力发电机系统.此风力机具有桨叶与轮毂刚性连接,失速控制靠叶片独特的翼形结构.这种风力发电机结构简单,造价低,具有较高的安全系数,但失速控制难度大,很少应用到 MW 级以上的风力发电机组控制上.

变桨距控制是指风力机叶片的安装角随风速改变而改变的一种控制.变桨距启动时可对风轮转速控制,并网后可对功率控制,从而使得风力发电机启动性能和功率输出特性较定桨距定速风机显著改善.但是,它的缺点是变桨距调节机构复杂,要求调节机构的相应速度快,易引起功率脉动.

主动失速控制系统,是将上述两种控制方式结合起来使用.允许叶片倾斜,但此倾斜度在一个很小的范围之内^[3].

1.2 发电机转速控制

失速调节定速系统,通常使用直接与电网相连的感应电机,变速系统则是使用感应电机或者同步电机.这两个系统都需要通过电力电子变换器来获得转矩和转速控制.

而变速系统的感应电机主要使用绕线转子,此转子的使用使得电力电子变换器能够通过滑环与转子电路相接,其优点在于通过使用一个低于正常功率 20% ~ 30% 的电力电子变换器即可获得可变的转速控制^[4].通过一个与转子相接的可变转子

阻抗, 系统中的电力电子变换器和滑动环能够完全避免, 在这种系统中, 转换阻抗被加到转子电路中, 而且将会和发电机的转子一起旋转, 但是这种系统的速度范围将会由于分散到转子阻抗的最大功率而受到限制^[5]。

变速恒频双馈风力发电系统最具发展潜力, 下面着重分析其用于转速控制的电力电子变换器装置。变速恒频双馈风力发电系统中电力电子变换器应为四象限变频器, 按其拓扑结构主要可分为交交变频器、交直交变频器和矩阵变换器 3 种类型。

交交变频器大多采用晶闸管自然换流方式, 工作可靠, 与电源之间进行无功功率的交换和有功率的回馈容易, 为四象限变频器, 其无环流系统的最高输出频率为电网供电频率的 $1/2$ 。尽管交交变频器还具有无中间直流滤波环节、变频效率高等优点, 在双馈变速恒频风力发电系统中得到一定的应用, 但由于交交变频器中晶闸管采用自然换流方式, 变频器始终吸收无功功率, 功率因数低, 谐波含量大, 输出频率低, 需要隔离变压器等, 使之在风力发电系统中应用受到一定的限制^[6]。

交直交变频器依据中间直流环节滤波形式的不同, 可分为电压源型和电流源型。交直交电压源型变频器是目前应用最广泛的变频器, 为实现双馈电机转子能量的双向传递, 交直交电压源变频器常采用双 PWM 形式。该类型的电力电子变换器具有结构简单、电流谐波含量小、输入功率因数可控等优点, 且直流环节的滤波电容可实现电网和电机转子侧的解耦。目前该类电力电子变换器已广泛应用于变速恒频风力发电系统。但该类型变频器直流环节的滤波电容体积较大, 寿命较短, 且双侧采用 PWM 控制, 开关损耗较大。

矩阵变换器是一种交交直接变频器, 由 9 个开关组成。矩阵式变换器没有中间直流环节, 功率电路简单、紧凑, 可输出幅值、频率、相位和相序均可控的电压, 谐波含量较小。变换器的输入功率因数可控, 可四象限运行, 适合变速恒频双馈风力发电系统^[6]。矩阵变换器具有上述优点, 但其换流过程不允许两个开关同时导通或同时关断, 实现比较困难, 故其在变速恒频双馈风力发电系统中的应用还处于研发阶段。

1.3 无功控制

风力发电机的无功控制由投入运行的风力发电机系统控制。一个直接与电网相连的感应电机组成的最简单的系统是使用电容器组来补偿无负荷发电机的无功消耗。当发电机有负荷时, 所消耗的

额外的无功则来自于与之相连的电网。

拥有电力电子变换器的系统能够提供充足的无功控制。在变换器适用范围之内, 它能够充分满足发电机的无功需求, 即在任何负荷情况下维持发电机输出的功率因素, 也能类似于静态电压补偿而进行电网的电压控制。值得指出的是, 通过适当的无功控制, 由于无功不平衡而引起的电压波动能够被消除, 从而能够降低其对电网的影响^[7]。

2 输电系统

2.1 交流输电

目前风力发电厂并网供电普遍采用交流输电加静止无功补偿器 (SVC) 形式。安装 SVC 对风力发电厂并网供电有两点意义: (1) 对电网侧安装 SVC 可以提供无功支持并且减小振荡。(2) 对风力发电机侧安装 SVC 可以实现动态电压控制和增加阻尼。图 4 所示为靠近风力发电厂侧的电网发生三相短路电流接地故障。图 5 所示为安装 SVC 和不安装 SVC 对发电机的影响的仿真对比。图 6 所示为安装 SVC 和不安装 SVC 对电网的影响的仿真对比。故障是持续 0.2 s 后自动重合闸成功。风力发电机是转子带鼠笼的感应机。图 5(a) 所示没有 SVC 发电机曲线有明显的低频振荡, (b) 所示安装了 SVC 有很好的阻尼作用。图 6 所示安装了 SVC 用约 2 s 时间电网电压恢复稳定^[4]。

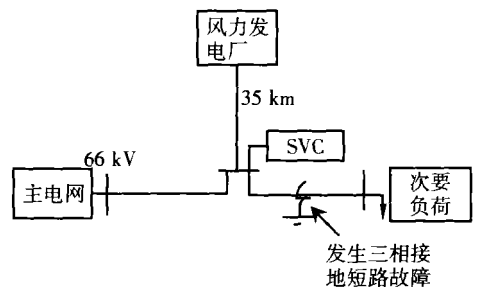


图 4 带 SVC 的并网供电的电路图

2.2 直流输电

基于电压源换流器 (VSC) 技术的直流输电被称之为轻型直流输电 (HVDC light), 其潜在的用途包括: 发电厂的连接、大城市内多端直流输电系统代替传统的交流配电网和将有可能被用到大型海上风电场。因为它允许海上风电场的交流网络与电网不保持同步运行, 一旦网络发生故障, 可以迅速恢复到故障前的输电能力。图 7 所示为 HVDC light 的输电原理图。采用 IGBT 的电压源换流器, 具有关断电流的能力, 可以应用脉宽调制技术 (PWM) 进行无源逆变, 解决了用直流输电向无交流电源的负荷点送电的问题。目前, 世界范围内采用该项技

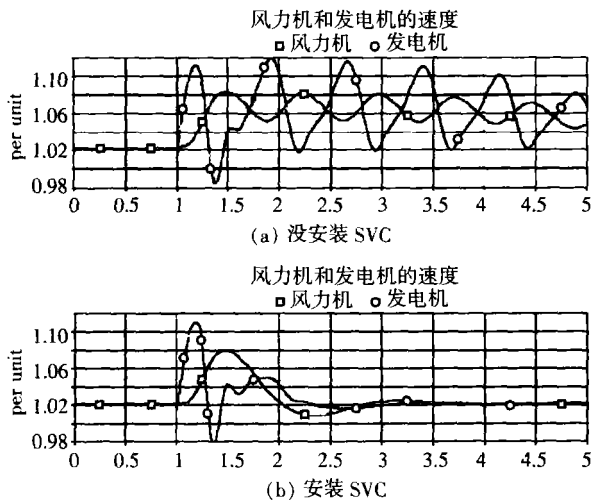


图 5 有无 SVC 对发电机的影响对比

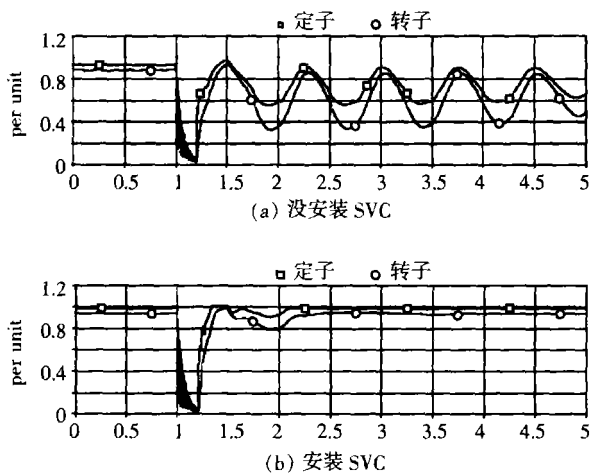


图 6 有无 SVC 对电网电压的影响对比

术的输电系统有 7 个, 其中 6 个已经投入运行, 分别用于电力交易、地下输电和并网发电, 另一个于 2005 年作为海上平台供电的方式投入运行。



图 7 HVDC light 输电原理图

2.3 未来海上风电场

目前, 风力发电正朝着大容量的海上风电场发展. 例如, 丹麦计划在 2030 年建一个大型的海上风电场. 这个风电场提出一个对电网有重大意义的电能贡献, 如频率和电压控制、调节有功和无功以及在电力系统的要求下暂态和动态快速响应. 由于控制方式的不同以及补偿器排列方式的不同, 该风电场具有不同结构类型. 例如, 采用集中补偿装置或者直流输电系统的交流局部网以及采用分散控制和直流输电系统相结合的直流局部网。

以下以一个 24MW 风电场带 40 个风力发电机系统为例来分析, 如果风电场采用直接并入交流

电网, 不带电力电子变换器的结构类型. 为了调节有功和无功, 需要采用双馈感应机 (DFIG) 和加集中的静止无功补偿器, 如图 8 (a) 所示. 由于海上风电场多为长距离输电, 基于这样的考虑, HVDC light 也是一种可行的方案, 如图 8 (b) 所示. 由于每一个风力发电机有自己的电力电子变换器, 所以也可以采用分散控制风力发电机同时直流输电并网, 这样可分别控制单个风力发电机工作在理想的速度, 如图 8 (c) 所示. 每个系统的结构类型都有自己的特征和适用性, 因此, 应针对不同的海上风电场的情况选择最合适的系统结构类型^[8].

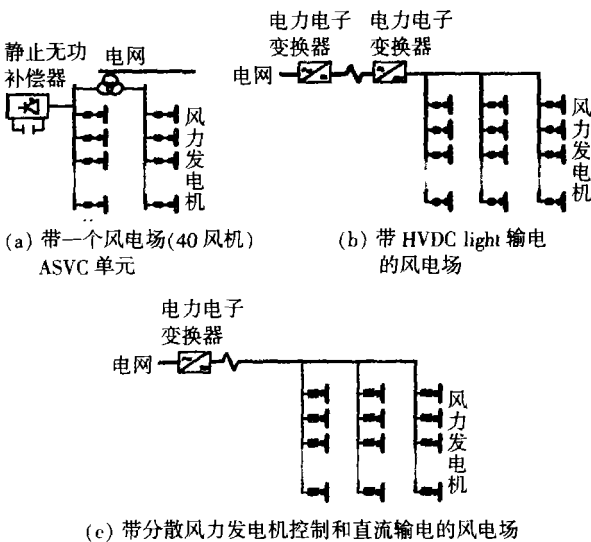


图 8 风场的安排

3 结论

风能是重要的能源资源, 我国要解决能源供应问题, 解决二氧化碳排放等问题, 实现可持续发展, 风电可以作出重大的贡献. 而风力发电需要电力电子设备, 电力电子技术在风力发电技术中扮演重要角色:

- (1) 为了增加风能的利用和减小电力电子变换器的能耗, 要选择适合的电力电子变换器来匹配变速风力发电机系统.
- (2) 交流输电带 SVC 是输电的主要选择, HVDC light 和 UPFC 不容忽视. 无论哪种输电方式, 无功源 SVC 或 TSC 都被电网所需要.
- (3) 增加无功源 SVC 或 TSC 有利于电网和风力发电机的故障恢复.
- (4) 每个系统结构都有自己的特征和适宜性, 针对于不同的海上风场要详细考虑, 选择最适合的系统结构. 未来大容量海上风电场将广泛应用电力电子装置.

(下转第 45 页)

于,算法的实现过程中涉及产生矩阵以及与矩阵大小相关的蝶型单元的运算, N 越大,相应的矩阵越大,需要运算的蝶型单元也就越多.改进的 FFT Pruning实现方法只需产生一个 $N \times \log_2(NL)$ 的矩阵,而后者需要产生3个 $N \times \log_2(N)$ 矩阵,当 N 较大时,前者的矩阵比后者小得多,整个程序花费的运行时间必然远少于后者.

3 结论

本文在文献[5]提出方法的基础上,结合文献[2]提出的输入端简化算法,对其中的实现方法作了改进,得到一种改进的基于 Pruning FFT算法的快速实现方法.当输入端仅有少数非零数据时,无需限定输入、输出数据的长度,通过去除无关频点的运算,能够快速得到频点位置任意的输出频谱.由于改进后的实现方法只针对某些我们感兴趣的频点做计算,略去无关频点的计算,大大降低了运算量,提高了使用的高效性和灵活性.同时本文用C语言实现了文中提出的快速实现方法,并在DSP C5402 Device Simulator软件模拟器上运行,统计其运行时钟周期,并与在相同条件下其他的 FFT Pruning实现方法的运行时钟周期相比较,实验结

果证明,本文提出的快速实现方法的计算量明显少于其他方法,有较强的实用性和参考价值.

[参考文献]

- [1] Markel J D. FFT pruning[J]. IEEE Trans on Audio Electroacoust, 1971, 19(4): 305-311
- [2] Skinner D P. Pruning the decimation in time FFT algorithm[J]. IEEE Trans on ASSP, 1976, 24(3): 193-194
- [3] Sreenivas T V, Rao P V S. FFT algorithm for both input and output pruning[J]. IEEE Trans on ASSP, 1979, 27(3): 291-292
- [4] Nagai K. Pruning the decimation in time FFT algorithm with frequency shift[J]. IEEE Trans on ASSP, 1986, 34(4): 1008-1010
- [5] Alves R G, Osorio P L, Swamy M N S. General FFT pruning[C] // Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium Michigan Lansing 2000, 1192-1195
- [6] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2003: 187-192

[责任编辑:刘健]

(上接第10页)

[参考文献]

- [1] 欧洲风能协会. 风力12关于2020年风电达到世界电力总量12%的蓝图[M]. 绿色中国,译. 北京:中国环境科学出版社, 2004: 20-21.
- [2] Tomas Petru. Modeling of wind turbine for power system studies[D]. Sweden Chalmers University of Technology, 2003
- [3] 张新房,徐大平,吕跃刚,等. 风力发电技术的发展和若干问题[J]. 现代电力, 2003, 20(5): 29-34
- [4] Las Gertmar. Power electronics and wind power[D]. Sweden Lund University, 2003
- [5] Vestas V47-660 kW brochure [EB/OL]. [2000-12-06]. <http://www.vestas.com/UK/news/press/20001found20001206UK.html>
- [6] 伍小杰,柴建云,王祥. 变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 92-96

- [7] Wikie J, Leithead W E, Anderson C. Modeling of wind turbines by simple models[J]. Wind Engineering, 1990, 14(4): 247-273
- [8] Frede Blaabjerg, Zhe Chen, Soever Baekhoej Kjaer. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems[J]. IEEE Trans on Power Electr, 2004, 19(5): 1184-1194
- [9] 张桂斌,徐政. 直流输电技术的新发展[J]. 中国电力, 2000, 33(3): 32-35
- [10] Rodríguez J M, Fernández J L, Beato D, et al. Incidence on power system dynamics of high penetration of fixed speed and doubly fed wind energy systems study of spanish case[J]. IEEE Trans on Power System, 2002, 17(4): 1089-1095
- [11] 马洪飞,徐殿国,苗立杰. 几种变速恒频风力发电系统控制方案的对比分析[J]. 电工技术杂志, 2000(10): 1-4

[责任编辑:严海琳]