

## 直驱式风电系统中变流器拓扑对比分析\*

马 威,包广清

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 针对直驱式风电系统变流器的拓扑结构进行研究。对常用的拓扑进行了分析和说明。对不控整流后接电流源型和电压源型逆变器、DC/DC 变换再接逆变器,以及背靠背双 PWM 变换器等各种变流器结构的工作原理、应用和优缺点进行了介绍和对比,并针对风电机组对大功率变流器的需求,对大功率变流器的特性和应用进行了相关分析与探讨。

**关键词:** 永磁同步发电机;直驱式风电系统;变流器;拓扑结构

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)15-0001-03

## Comparison and analysis on converter topology of direct-driven wind power system

MA Wei, BAO Guang Qing

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Direct-driven wind power system converter topology is studied. The paper analyzes and compares the basic topologies of direct-driven wind generation system, including uncontrollable rectifier followed current source inverter, uncontrollable rectifier followed voltage source inverter, uncontrollable rectifier followed DC-DC converter, and back-to-back PWM converter. Its working principle, application, advantages and disadvantages are introduced and compared in this paper. Analysis and discussion of characteristics and application of high-power converter are also given.

**Key words:** permanent magnet synchronous generator; direct-driven wind power system; converter; topological structure

在变速恒频风力发电系统中,使用双馈感应发电机(DFIG)的双馈式系统占据主流地位,而使用永磁同步发电机(PMSG)的直驱式系统也得到了越来越多的应用。与双馈式相比,直驱式风电系统采用低速永磁同步发电机结构,系统无需齿轮箱,具有机械损耗小、运行效率高、维护成本低等优点,因此在风力发电领域中具有很好的应用前景<sup>[1]</sup>。其原理如图 1 所示。

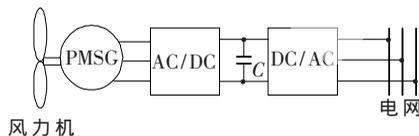


图 1 直驱式风电系统原理图

直驱式风电系统的风轮与 PMSG 直接相连,无需增速齿轮箱。其基本原理是先将风能转化为幅值和频率变化的交流电,再经整流之后变为直流,然后经逆变器变

换为三相频率恒定的交流电送入电网。通过中间的电力电子变换环节对系统的有功功率和无功功率进行控制,以达到最大风能追踪的目的。

由于直驱式风电系统的功率是全功率传输,因此必须使用全功率变流器。全功率变流器作为永磁直驱风电系统与电网的接口,其结构的选择对 PMSG 变速恒频运行性能至关重要<sup>[2]</sup>。

## 1 不控整流后接逆变器拓扑分析

不控整流后既可以接电流源型逆变器又可以接电压源型逆变器。图 2 是不控整流接电流源型逆变器的结构图。图 2(a)为由晶闸管构成的逆变器。早期的并网风机大都采用此种拓扑结构,晶闸管虽具有成本低、功率等级高等优点,但是晶闸管逆变器在工作时需要吸收无功功率,而且在电网侧也会产生较大的谐波电流,因此需要增加补偿系统来进行谐波抑制和无功补偿。这使系统的控制变得复杂,而且会加大系统的成本。与图 2(a)

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877034)

## 综述与评论 Review and Comment

相比较,图 2(b)所示逆变器容易实现自换流,能减小谐波分量,甚至可以省去补偿系统。此种拓扑是由不控整流接全控型器件构成的逆变器结构。

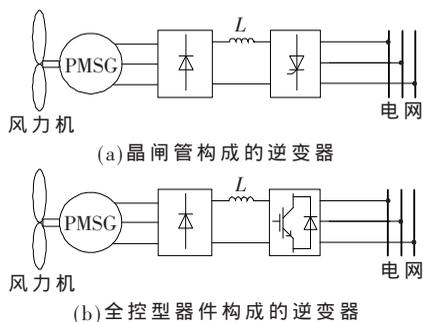


图 2 不控整流后接电流源型逆变器拓扑

不控整流后接电压源型逆变器的拓扑结构如图 3 所示。此种结构的特点是将变频变幅的交流电通过不控整流之后得到的直流电,直接通过由全控型器件组成的电压源型逆变器并入电网。与晶闸管变流器相比,此种拓扑优点是可以提高开关频率,减少谐波污染,并且可以通过控制逆变器输出调制电压的幅值和相位,灵活调节系统输出到电网的有功功率和无功功率,进而可以调节 PMSG 的转速,使其工作在最佳叶尖速状态,实现最大风能捕获。缺点是不能直接调节 PMSG 的电磁转矩,动态响应慢,并且当风速在较大范围内变化时,电压源型逆变器的调节作用很有限<sup>[3-6]</sup>。

在综合比较成本、动态响应和效率等因素下可知,电压源型 PWM 逆变器具有比较大的优势,因此目前小型风电机组中大多采用图 3 的拓扑结构。

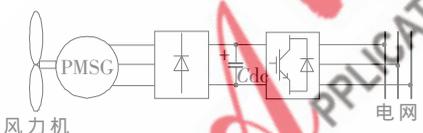


图 3 不控整流后接电压源型逆变器拓扑结构

## 2 不控整流后接 DC/DC 变换再接逆变器拓扑分析

此拓扑在结构上与以上拓扑的明显区别是中间增加了一个 DC/DC 变换环节,作用是可以校正输入侧的功率因数,提高发电机的运行效率。通过调节 DC/DC 变换器可以保持直流侧电压的稳定,同时可以对永磁同步电机的转矩和转速进行控制,保持变速恒频运行,实现最大风能捕获<sup>[7-9]</sup>。图 4 为不控整流接 DC/DC 变换再接逆变器的拓扑结构。

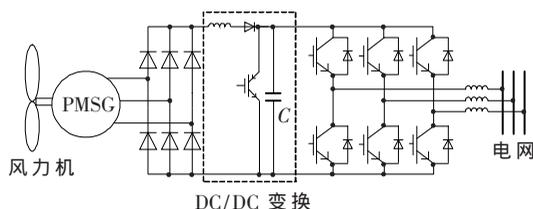


图 4 不控整流后接 DC/DC 变换接逆变器拓扑结构

如果改变图 4 中 DC/DC 变换器的结构,就可以得到不同的拓扑结构。参考文献[10]中指出 DC/DC 变换器采用 Buck 电路,可以实现和 Boost 电路同样的功能。参考文献[11]指出 DC/DC 变换器采用 Buck-Boost 电路,可以实现升降压的功能。在电压范围变换很大的情况下,可以考虑使用 Buck-Boost 电路。参考文献[12]通过三重 Boost 电路交错并联构成直流变换器,用改变占空比的方法来调节直流侧电压。3 个 Boost 电路交错并联,还可以减小谐波畸变。

可以看出,系统通过加入 DC/DC 变换环节,可使直流输入电压等级提高,系统控制简单,控制方法灵活,开关器件利用率高。逆变器具有输入电压稳定、逆变效果好、谐波含量低、经济性好等优点。在实际应用中,小功率和兆瓦级直驱风电系统大多采用此种拓扑。

## 3 背靠背双 PWM 变流器拓扑分析

双 PWM 变流器由电机侧变流器和电网侧变流器构成,其拓扑结构如图 5 所示。

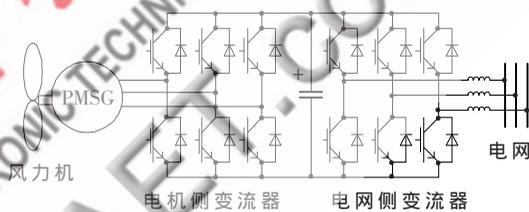


图 5 背靠背双 PWM 变流器拓扑结构

电机侧变流器通过调节定子侧的 d 轴和 q 轴电流,可以控制发电机的电磁转矩和定子的无功功率,使发电机变速恒频运行,可在额定风速以下捕获最大风能;电网侧变流器通过调节电网侧的 d 轴和 q 轴电流,可以实现输出有功和无功功率的解耦控制、直流侧电压控制以及输出并网。此外,还能灵活实现发电机的起动和制动等功能。

不控整流+DC/DC 变换+逆变器是三级变换,而双 PWM 变流器是两级变换,所以效率高,但全控型器件数量增多,控制电路较复杂,相应地成本较高。不控整流+DC/DC 变换+逆变器拓扑,控制相对简单,也容易实现,可靠性高,节约了系统成本。这两种拓扑各有优缺点,是目前比较常用的拓扑。

## 4 大功率变流器拓扑分析

直驱型风力发电系统需要大功率变流器,传统二电平拓扑结构在面对变流器电压等级与容量不断增大的需求时,不再满足要求。因此人们往往将现有的功率器件串联起来提高逆变器容量,目前在直驱型风力发电系统中常用的大功率变流器主要有直接串联 IGBT 高压变频器、三电平背靠背二极管箝位式变频器。

直接串联 IGBT 高压变频器应用在直驱式风电系统中的拓扑电路如图 6 所示。

《微型机与应用》2010 年 第 29 卷 第 15 期

## 综述与评论 Review and Comment

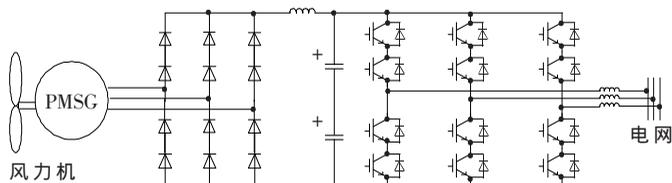


图6 直接串联 IGBT 逆变器

逆变器的功率器件采用 2 个 IGBT 串联构成,由 PMSG 产生的高压交流电进入变流器,经过高压二极管全桥整流以及平波电抗器和电容滤波,再通过逆变器逆变,经过滤波器后实现并网。

采用功率器件串并联方式提高变流器的功率,虽具有拓扑结构简单、功率器件个数少等优点,但器件串联会带来分压不均问题,器件并联会带来器件的均流问题,因而对驱动电路的要求也大大提高。要求要尽量做到串联器件同时导通和关断,否则由于各器件开断时间不一,承受电压不均或分流不均,会导致器件损坏甚至整个变流器崩溃。

图 7 是三电平背靠背二极管箝位式变频器的拓扑结构。永磁直驱风电系统中使用的多电平变流器以三电平和五电平为主。三电平拓扑中的开关器件电压应力仅为两电平拓扑功率的 1/2,滤波电感损耗比两电平的小,这种形式不仅结构简单,而且可以克服传统两电平变流器交流侧波形畸变率高的缺点,还可以在采用同样耐压等级开关器件的情况下提高变流器的电压等级,达到变流器高压大功率传输的目的。

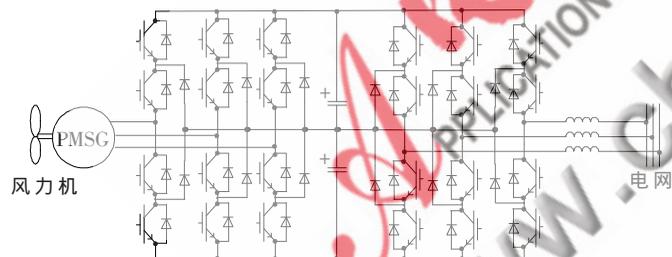


图7 三电平背靠背二极管箝位式变频器拓扑结构

多电平变流器具有抑制谐波、提高功率因数、减小电压应力、减小电磁扰动和波形畸变等优点。但也存在不足之处,如直流母线电容电压不平衡,同一桥臂功率器件电流电压应力不平衡,功率器件多、控制复杂等。因此,目前国内外对多电平变流器的研究主要集中在控制策略的优化上。

直驱式风电系统是全功率传输,研究其变流器的结构对提高系统运行效率和系统的稳定性具有重要意义。本文对适合于永磁直驱风电系统的多种变流器的拓扑结构进行了总结、分析和对比,并列出了各自的优缺点,分析和介绍了部分大功率变流器的原理和应用。本文还指出了目前在永磁直驱风电系统当中应用较多的变流

《微型机与应用》2010年 第29卷 第15期

器是不控整流后接 DC/DC 变换再加并网逆变器结构和背靠背双 PWM 变流器。随着风电机组容量的不断增大,多电平大功率变流器将会在直驱式风电系统中得到广泛应用和推广。

## 参考文献

- [1] 陈雷,邢作霞,潘建,等.大型风力发电机组技术发展趋势[J].可再生能源,2003(1):27-30.
- [2] 徐锋,王辉,杨韬仪.兆瓦级永磁直驱风力发电机组变流技术[J].电力自动化设备,2007(7):57-60.
- [3] 赵栋利,胡书举,赵斌,等.风力发电机、变流器及其低电压穿越概述[J].变频器世界,2009(2):35-39.
- [4] BIERHOFF M H, FUCHS F W. Semiconductor losses in voltage source and current source IGBT converters based on analytical derivation[A]. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference(PESC)[C].2004(4):2836-2842.
- [5] CHUANWEI YANG, HUI LIANG, JIUCHUN JIANG. Modeling and simulation of AC-DC-AC converter for MW-level direct-drive system wind turbine interface grid [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2006(3):1-4.
- [6] PRAVEEN K, BOTTRILL J J. AC/DC converter topologies for the space station[J]. IEEE, 1993(4):425-432.
- [7] GUO Zhenhong, CHANG Liuchen. New converter topologies for two-phase wind turbine PMSG generation system [J]. IEEE, 2007(3):536-538.
- [8] 邓秋玲,谢秋月,黄守道,等.直驱永磁同步风力发电系统研究[J].微电机,2008(6):53-56.
- [9] XU Dewei, LUO Zhenhan. A novel AC-DC converter for PMSG variable speed wind energy conversion systems [J]. IEEE,2009(2):1117-1119.
- [10] HU Y, CHEN Z. Modeling of frequency and power control in an autonomous power system with wind turbines and diesel generation units [J]. IEEE, Transmission and Distribution Conference 2005:1-8.
- [11] XIONG Xin, LIANG Hui. Research on multiple boost converter based on MW-level wind energy conversion system[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China: [s.n.], 2005:1046-1049.
- [12] 朱德明,秦海鸿,严仰光.三电平 Buck-Boost 双向变换器的仿真研究[J].电源世界,2005(4):19-23.

(收稿日期:2010-03-10)

## 作者简介:

马威,男,1981年生,硕士研究生,主要研究方向:电路与系统。

包广清,女,副教授,研究生导师,主要研究方向:电力电子传动。

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 3