

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

罗慧达, 崔学深, 崔存岗, 申旭辉, 汤海雁.
面向LCC中压直流接入的双馈风力发电系
统宽频率范围控制.
电机与控制应用, 2022, 49(3): 87.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

面向 LCC 中压直流接入的双馈风力发电系统 宽频率范围控制*

罗慧达¹, 崔学深¹, 崔存岗¹, 申旭辉², 汤海雁²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 针对单机独立运行的双馈风力发电系统, 提出一种面向中压直流接入的宽频率范围控制策略。与传统的电网换相换流器(LCC)直流接入不同的是, 通过对双馈风力发电机转子侧换流器与 LCC 的协调控制, 使得定子频率随着风速变化在一个较宽范围内变化, 与此同时保持定子磁链不变, 从而实现双馈风力发电机的高效运行。对单台 1.5 MW 双馈风力发电机组宽频率范围控制策略进行了仿真, 结果表明从切入风速到额定风速的最大风能追踪区域, 均可实现宽频率范围控制, 且全风速范围内效率均有所提高。

关键词: 双馈风力发电机; 宽频率范围; 高效协调; 中压直流接入

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0087-06

doi: 10.12177/emca.2021.202

Wide Frequency Range Control of Doubly-Fed Wind Power Generation System for LCC Medium Voltage DC Access*

LUO Huida¹, CUI Xueshen¹, CUI Cungang¹, SHEN Xuhui², TANG Haiyan²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China;

2. China Huaneng Group Clean Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: A wide frequency range control strategy for medium voltage DC access is proposed for doubly-fed wind power generation system with stand-alone operation. Compared with the traditional line-commutated converter (LCC) DC connection, through the coordinated control of the rotor side converter and the grid converter of the doubly-fed wind generator, the stator frequency changes in a wide range with the wind speed, while keeping the stator flux unchanged, so as to realize the efficient operation of the doubly-fed wind generator. Simulation is carried out with the wide frequency range control strategy of a single 1.5 MW doubly-fed wind generation. The simulation results show that in the maximum wind energy tracking region from the cut-in wind speed to the rated wind speed, wide frequency range control can be achieved, and the efficiency is improved in the whole wind speed range.

Key words: doubly-fed wind generator; wide frequency range; efficient coordination; medium voltage DC access

收稿日期: 2021-12-13; 收到修改稿日期: 2022-02-16

* 基金项目: 华能集团总部科技项目(HNKJ20-H88)

作者简介: 罗慧达(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为双馈风力发电控制。

崔学深(1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为双馈感应电机控制及应用。

0 引言

海上风电因其具有风速相对稳定、更加靠近负荷中心等优势,逐渐成为世界各国的研究热点之一^[1-2]。对于离岸距离远、容量大的海上风电,传统的交流输电无法满足其输电需求。而直流输电因其输电线路造价低、无相位功角问题、运行稳定性好以及调度管理简便等优点,适合海上风电这样的远距离输电^[3-7]。对于应用于海上直流风电场中的风电机组,永磁直驱风电系统因其控制相对简单且故障维护率低,成为大容量海上风电机组的首选机型^[8],但成本很高。而对于在风力发电中占有较大比重的双馈风电机组(DFIG)^[9-12],在发电机和变流器成本方面均远低于直驱风电系统,且没有转子退磁风险,仍具有不错的应用前景。

研究表明,众多直流风电场拓扑结构中,并联型海上直流风电场采用中压直流(MVDC)汇聚,高压直流传输最容易实现^[13-15]。风电机组可以单独经交流变压器升压,整流后直接接入风电场中压直流汇集网络,这种中压直流并联型海上风电场各风力发电机组的控制独立。这里若选用永磁直驱,需要经过整流逆变再交流升压再整流,换流器过多,或先整流再经过 DC/DC 升压,DC/DC 升压器的成本也较高。因此,本文选择对单台 DFIG 系统接入中压直流电网的控制策略和方法展开研究,在 DFIG 经整流环节单独直流并网条件下,交流侧频率可以在一定范围内调节,通过控制 DFIG 的定子频率实时跟随风速转速的变化进行调节,就可以大大减小转差功率,减小损耗,提高系统运行效率。

在 DFIG 的直流并网研究中,主要有以下三种拓扑结构:(1)基于定子不控整流的 DFIG 直流并网结构;(2)基于电网换相换流器(LCC)的 DFIG 直流并网结构;(3)基于电压源型换流器(VSC)的 DFIG 直流并网结构。首先基于不控整流直流并网的拓扑结构虽然在换流器成本上最低,但由于采用的是不控整流,存在定子电压不可控的问题,在电机宽频率范围运行时会出现低频运行时的磁链饱和及高频运行时的弱磁过深等现象^[16-17]。而 VSC 直流并网换流器成本较高。因此,本文选择针对基于 LCC 直流并网的拓扑结构

的控制策略展开研究,既能控制定子电压跟随频率变化,成本也相对较低。

传统的基于 LCC 直流输电的双馈风力发电系统的转子侧换流器(RSC)大多直接采用与交流并网相似的控制策略,控制发电频率为 50 Hz,没有充分发挥直流输电中发电频率不必严格控制为工频的优势。而传统 LCC 的控制大多采用定直流电流控制,除此之外,还有定直流电压控制、定有功功率控制等^[18-20]。

本文针对基于 LCC 直流输电的 DFIG 系统,提出一种 DFIG 系统宽频率范围的控制策略。该控制策略主要通过 RSC 和 LCC 的协调控制实现,其中 LCC 可采用 12 脉波整流,从而减小谐波,提高电能质量^[21]。具体控制策略就是在实现最大风能追踪控制和保持定子磁链不变的同时,对双馈风力发电机的定子频率进行适当调整,最终实现宽频率范围控制,从而提高电机运行效率。

1 系统拓扑和数学模型

1.1 双馈风力发电系统 LCC-MVDC 系统拓扑

图 1 所示是本文所研究的双馈风力发电系统 LCC-MVDC 拓扑结构。换流器与变压器一同集成于风电机组平台,单台 DFIG 经各自的换流器整流后,经过直流电缆接入海上中压直流换流站汇集。

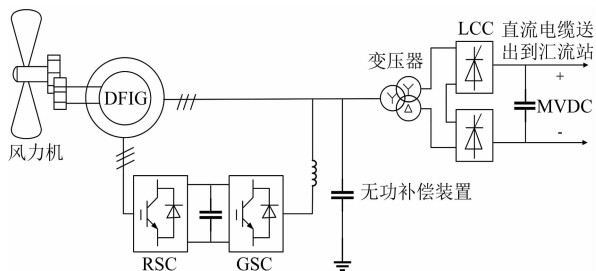


图 1 双馈风力发电系统 LCC-MVDC 结构

图 1 的 DFIG 系统拓扑结构中,本文设计采用的是 1.5 MW 双馈风力发电机,出口电压为 690 V,经 690 V/30 kV/30 kV 的三绕组变压器升压输送至换流站,再经 LCC 整流与±30 kV 中压直流网相连。

1.2 DFIG 数学模型

本文采用异步电机在两相同步速旋转 dq 坐标系下的数学模型,该模型由三相静止 abc 坐标

量均与风速有关,仿真中随着时间变化风速线性增加,并且仿真结果中均以风速为横坐标,从而直观地反映各电气量与风速之间的关系。根据双馈风力发电相关知识可知,MPPT 模式下转速与风速是正比例关系,而转矩与风速的平方成正比。从图 3 可以看出仿真结果与理论基本一致。仿真结果中 DFIG 的电磁转矩和输入转矩大小基本相同。定子磁链也与参考值一致,基本维持在 1.794 Wb,证明了图 2 给出的控制策略能够实现转矩和磁链的解耦控制。在发电机中,由于电磁转矩是制动转矩,所以在仿真结果中为负值,其绝对值随风速增大而增大。

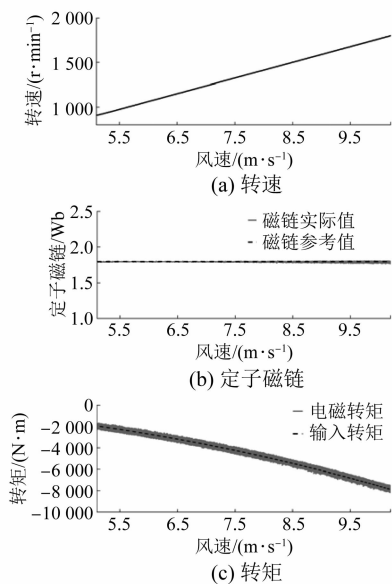


图 3 宽频率范围控制电机转速、定子磁链、转矩变化

2.2 LCC 控制策略

LCC 采用的是晶闸管整流,直流输电实际运行中为了提高功率因数,触发角 α 一般尽量控制得比较小。然而,为了确保触发前阀上有足够的电压,LCC 有一个最小触发角的限制^[19]。世界上大部分直流输电工程采用的最小触发角 α 均 5° 。因此,当风速为切入风速时,控制定子电压为触发角为 5° 时所对应的电压,此时电压小于 DFIG 的额定电压;当风速为 DFIG 转速恰好为额定转速所对应的风速时,控制定子电压为 DFIG 的额定电压。由此建立风速与定子电压之间的线性关系,再将此电压参考值按照式(8)计算得到定子频率参考值,当风速发生变化时,频率参考值与实

际值的差值通过 PI 调节器输出作为触发角 α 的相关信号,从而实现定子频率的控制。而由于 MPPT 模式下风速与转速之间也是线性关系,因此,实际应用中将风速与参考频率的关系转变成电机转速与参考频率之间的关系更为实用。LCC 控制框图如图 4 所示。

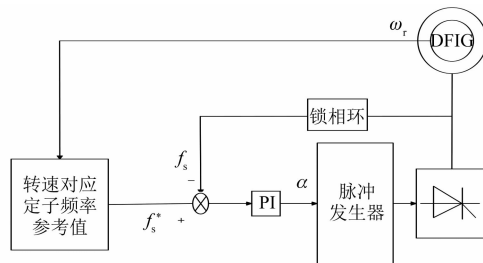


图 4 LCC 控制框图

12 脉波整流后的直流电压与定子电压及触发角之间的关系为

$$U_d = \frac{6\sqrt{6}}{\pi} U_2 \cos \alpha \quad (9)$$

式中: U_d 为直流电压; U_2 为定子相电压有效值。

根据式(8)可知,定子磁链由定子侧相电压幅值 u_{s1} 和定子角频率 ω_s 决定,也就是说,当风速增大时,通过调节触发角使得定子电压增大,同时 RSC 控制定子磁链保持不变,两者协调控制就能使定子频率与定子电压成比例增大,从而实现 DFIG 宽频率范围控制。全风速范围内定子频率与风速之间的关系如图 5 所示。

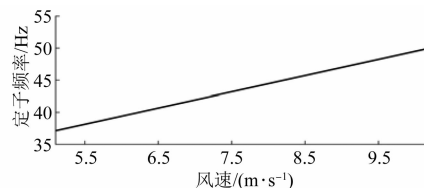


图 5 全风速范围定子频率变化

2.3 RSC 和 LCC 协调控制关系

图 6 给出了双馈风力发电系统 RSC 和 LCC 协调控制关系图。对于 LCC 的控制,因其为晶闸管装置,只需对其触发角进行控制即可。频率参考值和实测频率计算值之间的误差经 PI 调节器输出作为触发角 α ,并将该输出作为脉冲发生器的输入来产生控制 LCC 的脉冲信号。

对于 RSC 的控制,从图 2 可以看出 DFIG 系统的磁链控制通过电流内环和磁链外环两个闭环

来实现。功率控制则通过电流内环和功率外环两个闭环来实现。磁链参考值由定子额定电压及工频计算得到,定子角频率参考值可按照式(8)定子相电压幅值参考值除以磁链参考值得到,进一步也能计算得到定子频率参考值。功率参考值则由最大风能追踪相关公式计算得出。磁链参考值和实际磁链之间的误差经 PI 调节器输出作为 i_{rd}^* ,而功率参考值和实测功率计算值之间的误差经 PI 调节器输出作为 i_{rq}^* 。再把 i_{rd}^* 和 i_{rq}^* 的误差分别通入两个 PI 调节器,输出转子电压 dq 分量的参考值再经过坐标变换得到 abc 坐标下转子电压参考值。最后将该电压参考值作为 PWM 装置的输入,经过调制产生控制 RSC 的开关信号,进而实现恒定磁链及最大风能追踪的控制目标。

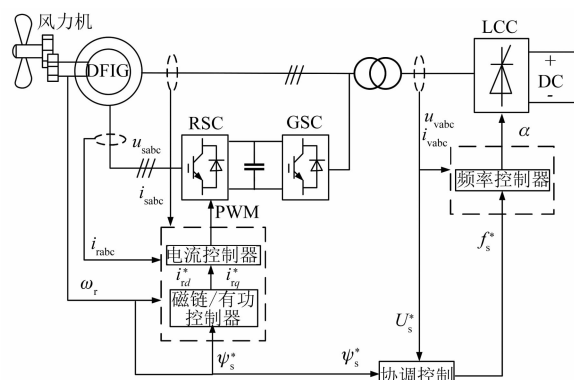


图6 RSC与LCC协调控制框图

3 仿真实现

基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建中压直流输电的双馈风力发电系统模型,其中 DFIG 的额定功率为 1.5 MW,额定线电压为 690 V,极对数为 2,经 690 V/30 kV/30 kV 三绕组变压器升压后再经 12 脉波 LCC 整流与 ± 30 kV 直流输电线相连。在频率为工频 50 Hz 时可以计算得到定子饱和磁链是 1.794 Wb。仿真模型中风速 5.1 m/s 为切入风速,对应发电机转速为 900 r/min,定子频率参考值取触发角 $\alpha=5^\circ$ 时的定子相电压 418.8 V 所对应的定子频率 37.2 Hz;额定转速 1 800 r/min 对应的风速为 10.2 m/s,定子频率参考值为 50 Hz,此时电压为额定电压。下面通过比较本文所提出的宽频率范围控制与传统的恒压恒频控制的仿真结果来证明宽频率范围控制的优越性。

图 7 显示了两种控制策略全风速范围内转差

率及定转子功率的变化。因为本文定转子采用的都是电动机惯例,所以仿真中功率为负表示向外发出功率。采用宽频率范围控制时由于控制频率随着风速增加而增加,使得转差在一个更小的范围内变化,转子功率的变化范围也更小,从而减小低风速时定转子之间的功率环流。

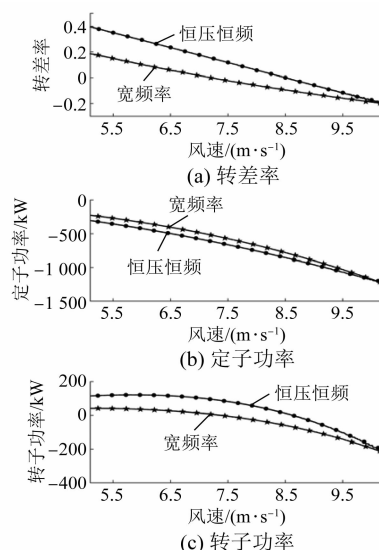


图7 两种控制策略全风速范围转差及定转子功率变化

图 8 显示了两种控制策略下 DFIG 定转子损耗和定子铁耗随风速的变化。由于两种控制策略都运行于 MPPT 模式,转矩相同,而且全风速范围内磁链都保持额定磁链,因此电机铜耗基本相同。而宽频率范围控制在低风速时降低了频率,从而有效地减小了电机铁耗,提高了电机的运行效率。

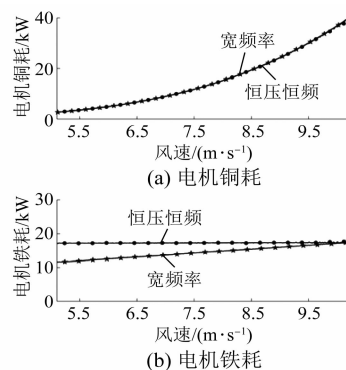


图8 电机铜耗及电机铁耗

图 9 给出了两种控制策略的 DFIG 的总损耗及效率。从图中可以看出,宽频率范围控制的损耗在全风速范围内都小于恒压恒频控制,从而证明宽频率范围控制能够提高电机效率,实现节能

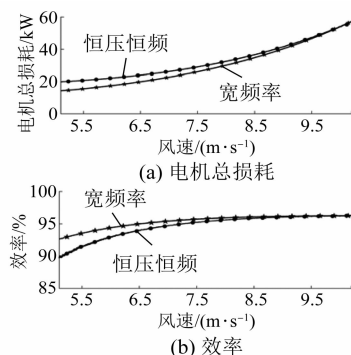


图9 DFIG 总损耗及效率

的目标。这对于发电领域有着十分重要的意义。

4 结 语

双馈风力发电系统宽频率范围控制策略,随着风速提高,在保持定子磁链不变的同时,通过调节晶闸管整流的触发角提高定子侧频率。仿真结果证明,宽频率范围控制的运行特性明显优于恒压恒频控制,能够使得转差率在一个较小的范围内变动,从而减小定转子间的功率环流。此外,宽频率范围控制还能降低能耗,使系统更加经济、高效地运行,这对于双馈风力发电系统的实际运行有着十分重要的意义。

【参 考 文 献】

- [1] 黄海龙,胡志良,代万宝,等. 海上风电发展现状及发展趋势[J]. 能源与节能,2020(6): 51.
- [2] 迟永宁,梁伟,张占奎,等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14): 3758.
- [3] BLASCO-GIMENEZ R, ANÓ-VILLALBA S, RODRIGUEZ-D'ERLÉE J, et al. Diode-based HVDC link for the connection of large offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011,26(2): 615.
- [4] 武霄,崔勇,郭强. 高压直流控制原理研究[J]. 上海电力学院学报,2014,30(5): 437.
- [5] BRESESTI P, KLING W L, HENDRIKS R L, et al. HVDC connection of offshore wind farms to the transmission system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(1): 37.
- [6] DU Z, KOU L, YANG Y, et al. Emergency power control strategies applied for offshore wind farms connected by HVDC system [C] //2019 4th IEEE

- Workshop on the Electronic Grid (eGRID), 2019.
- [7] 王锡凡,卫晓辉,宁联辉,等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31): 5459.
- [8] 杨仁炘,施刚,蔡旭. 海上全直流型风电场的电压源型控制[J]. 电工技术学报,2018,33(增刊2): 546.
- [9] 李华柏,栗慧龙,谢永超. 基于自抗扰控制的双馈风力发电系统最大功率追踪研究[J]. 电机与控制应用,2021,48(2): 71.
- [10] 冯煜尧,张开华,诸浩君,等. 海上双馈电机开路故障容错性能评估[J]. 电机与控制应用,2017,44(11): 111.
- [11] MISRA H, JAIN A K. Analysis of stand-alone DFIG-DC system and DC voltage regulation with reduced sensors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(6): 4402.
- [12] EL-HELW H M, TENNAKON S B. Vector control of a doubly fed induction generator for standalone wind energy application[C]//2008 Wind Power to the Grid-EPE Wind Energy Chapter 1st Seminar,2008.
- [13] CHEN W, HUANG A Q, LI C, et al. Analysis and comparison of medium voltage high power DC/DC converters for offshore wind energy systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(4): 2014.
- [14] 蔡思焯. 中压直流输电 MMC 逆变系统建模与控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [15] 杨仁炘,孙长江,蔡旭,等. 应用于海上直流风场的模块化多电平多端口直流变电站拓扑探究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(增刊1): 61.
- [16] CUI X, ZHANG H, LIU Q, et al. Wide frequency operation control method of DFIG connected to DC grid with constant slip[C]//2019 IEEE International Conference Industrial Technology (ICIT), 2019.
- [17] 崔学深,张恒,刘其辉,等. 直流并网型双馈风力发电系统限转子功率运行控制方法[J]. 电机与控制学报,2019,23(12): 8.
- [18] MEAH K, ULA S. Investigation on fuzzy logic-based self-tuning current controller applications in HVDC Links [C] // 2007 IEEE Region 5 Technical Conference,2007.
- [19] 黄绍平,彭晓,浣喜明. 基于 MATLAB 的高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 高电压技术,2004(3): 53.
- [20] 吴芳柱. 基于 LCC-MMC 的混合直流输电系统优化控制方法[J]. 电机与控制应用,2021,48(11): 86.
- [21] 王剑超. 基于 MATLAB 的十二脉波整流与六脉波整流仿真电路的谐波比较[J]. 机械管理开发,2012(5): 83.