

电网电压不平衡时永磁直驱风电机组的控制策略

贾春桥

(黑龙江龙源新能源发展有限公司)

摘要:针对电网电压不平衡时,永磁直驱风电机组输出有功、无功功率不稳定的问题,分析了风电机组在电网电压不平衡时的运行机理,提出了一种基于矢量控制的转子侧变换器控制策略,实现了电网电压不平衡时永磁直驱风电机组的有功功率和无功功率输出。仿真结果表明,在电网电压不平衡时,基于矢量控制的转子侧变换器控制策略可以使永磁直驱风电机组在保持额定风速运行的情况下输出有功、无功功率稳定。

关键词:电网电压;不平衡;永磁直驱;风电机组;控制策略

【DOI】10.12293/j.issn.1671-2226.2024.01.044

随着全球能源的日益紧缺和环境污染问题的日益突出,人们对清洁能源的需求不断增加。风能作为一种绿色可再生能源,是新世纪最具开发潜力的新能源之一。风力发电作为一种绿色环保的发电方式,越来越受到人们的重视。随着风力发电机组单机容量和风电场规模的不断增大,传统交流传动风电机组已不能满足其运行需求。永磁直驱风电机组因其具有高功率因数、高效率、低电压穿越等优点,逐渐成为风电机组的主流机型。永磁直驱风电机组以定子电流为励磁,通过电力电子变换器直接驱动风力发电机,相比传统交流传动风电机组,其结构简单、运行可靠、维护方便、控制灵活等优点。在电网电压不平衡时,由于定子绕组电流的相位与电压相位相反,产生了较大的电流环流和有功功率振荡,导致永磁直驱风电机组不能正常运行。本文对永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时的运行机理进行了分析,提出了一种基于矢量控制的转子侧变换器控制策略,实现了永磁直驱风电机组在保持额定风速运行的情况下输出有功和无功功率稳定。

一、永磁直驱风电机组结构

风电机组主要由转子、定子和控制器三部分组成,转子包括励磁机和永磁电机,定子包括永磁体和电磁转矩。永磁电机由永磁体、转子、永磁同步电机轴、驱动电机、控制电路组成,控制电路中包括功率器件和控制电路。永磁体通过磁场将电能转化为磁场能,从而将直流电转变为交流电。电磁转矩是由驱动电机通过电磁转矩转换器将转矩从励磁机传递到永磁同步电机上的过程,励磁机的转速与发电机的转速相同,转矩也与发电机的转矩相同。励磁机采用永磁同步电机驱动。直驱发电机和励磁机直接相连,无需中间变压器。励磁机安装在发电机的定子侧,通过电力电子变换器将发电侧与电网电压连接,使其具有并网和解耦能力,可实现无功和有功功率的解耦控制,但无法实现电压跌落时对并网直流母线的保护。

二、电网电压不平衡时永磁直驱风电机组控制的

意义

随着可再生能源的迅速发展,风力发电在电网中的地位日益重要。然而,由于风能的随机性和间歇性,风电机组常常会受到电网电压不平衡的影响。电网电压不平衡会导致电机运行不稳定,从而影响电能质量和效率。在这种情况下,对永磁直驱风电机组进行有效的控制就显得尤为重要。

永磁直驱风电机组的特点是直接驱动发电机,无需经过齿轮箱等机械转换装置。这种设计使得机组运行更加稳定,同时也提高了效率。然而,当电网电压不平衡时,永磁直驱风电机组也面临着一系列的控制问题。此时,合理的控制策略可以有效地应对这些挑战。

首先,通过对发电机转子磁场的调节,可以实现电网电压的平衡。这种调节通常依赖于对电机电流和转速的实时监测和控制。当电网电压不平衡时,通过调整磁场的强度和方向,可以使得发电机输出更稳定的电能。其次,合理的控制策略还可以提高风电机组的运行效率。通过对风速、电网电压、电机温度等因素的综合考虑,可以实现机组的最佳运行状态。这样不仅可以提高电能的品质,还可以降低电机的损耗,延长其使用寿命。最后,有效的控制策略还可以提高风电机组的可靠性。在电网电压不平衡的情况下,通过合理的控制策略可以减少故障的发生,从而提高整个风电系统的可靠性。

综上所述,电网电压不平衡时对永磁直驱风电机组进行有效的控制具有重要意义。这不仅可以提高电能的品质和效率,还可以延长电机的使用寿命,提高整个风电系统的可靠性。因此,对于风电行业来说,深入研究并应用合理的控制策略是至关重要的。

三、永磁直驱风力发电机组的数学模型

永磁直驱风力发电机组(PMSG)是一种基于永磁同步电机(PMSG)技术的新型风力发电系统,与传统的双馈异步风力发电机(DFIG)相比,它具有功率因数高、转矩转速比大等优点,是当前最具潜力的风力发电系统之一。永磁直驱风力发电机组主要由发电机、电

科学进步

网、齿轮箱等组成。

由于永磁同步电机采用磁链定向矢量控制，因此电机绕组中只有两个磁链分量，而在实际工程中需要控制定子电流和转矩的相位关系，故需要增加一个控制环节。通过dq坐标变换可以将定子电流和转子电流分别转换成磁链分量和转矩分量，然后通过解耦控制策略即可实现对永磁直驱风力发电机组的控制。

由于三相定子绕组中含有两个磁链分量，而两个磁链分量分别由定、转子磁场定向矢量控制系统来控制。在电网电压不平衡时，永磁直驱风力发电机组通过调整励磁电流和转子转速以改变发电机定子侧电流和转子侧电流的相位关系。同时通过调整励磁电流来改变定、转子磁场定向矢量控制系统的磁链和转矩，从而使定子电压保持平衡状态。根据实际工程经验可知，电网电压不平衡时永磁直驱风力发电机组的并网运行状态主要受直流母线电压不平衡的影响。由于电网电压不平衡会导致定子侧三相电流产生幅值不同的相位差，因此直流母线电压不平衡将会对永磁直驱风力发电机组产生影响。

由于直流母线电压不平衡会对永磁直驱风力发电机组产生影响，因此在直流母线电压不平衡时需要采取一定的控制策略来抑制直流母线电压不平衡的影响。这里采用的控制策略是基于dq坐标系下的解耦控制策略。dq坐标系下永磁直驱风力发电机组采用三相交流电流来表示其运行状态。假设定子侧电流 I 由定、转子磁场定向矢量控制系统控制。根据能量守恒定律可知在定子磁场定向矢量控制系统中定、转子电流和转子磁链是相互独立的，可采用定、转子磁场定向矢量控制系统来实现对定子侧电流和转子磁链的控制。

四、电网电压不平衡时永磁直驱风力发电系统运行机理分析

永磁直驱风电机组主要由风轮、永磁同步发电机、直流侧变换器和网侧变换器等部分组成。其中，永磁同步发电机是整个风力发电系统的核心，其转速和转矩由定子直接控制；直流侧变换器的作用是将直流侧电压变换为交流侧电压，并对交流侧电流进行控制，其基本控制策略为：先确定最大风能利用系数，然后通过调节直流侧电压和转子电流，实现最大风能利用系数的变化，最终实现变流器输出功率的变化。

当电网电压不平衡时，电网电压出现负序分量时，其所产生的负序电流将会对永磁同步发电机定子磁链和转子电流产生较大的影响。为了分析不平衡时永磁直驱风力发电系统的运行机理，基于矢量控制理论建立永磁直驱风电机组仿真模型。

在电网电压不平衡时，永磁直驱风电机组的定子

电流由正负序分量所组成。其中，正序分量包括两个方向相反的有功分量和无功分量，负序分量只包含两个方向相同的有功分量和无功分量。在不平衡电网电压下，由于直流侧电压出现较大幅度的波动，造成了交流侧电压发生不平衡现象。当直流侧电压不平衡时，定子磁链中的直流分量在正序和负序分量中所占比例较大，所以由转子电流产生的无功功率对定子电流产生了较大的影响。

五、电网电压不平衡时网侧变换器的控制策略

永磁直驱风电机组中，网侧变换器是关键电力电子设备，负责将风电机组的直流或交流电力传输到电网。当电网电压不平衡时，变换器需要具备相应的控制策略来保证电能稳定传输，同时还要考虑到系统效率和设备寿命。

1. 控制策略

(1) 实时监测：网侧变换器应具备实时监测电网电压的能力，以便及时发现电压不平衡的情况。

(2) 自动调整：当检测到电网电压不平衡时，变换器应能自动调整自身的输出电压，以保持与电网的匹配。

(3) 动态响应：在电网电压波动时，变换器应具备快速的动态响应能力，以保证电力的稳定传输。

(4) 效率优化：在调整输出电压的同时，变换器应尽可能保持较高的效率，以减少对系统的影响。

(5) 故障应对：当发生故障时，变换器应能及时切断输出，避免对电网造成更大的影响。

2. 实现方式

实现以上控制策略，通常需要采用矢量控制、直接转矩控制等先进控制策略，以及适当的硬件设备，如电力电子开关、控制器等。为了提高系统还可以引入一些保护机制，如过压保护、欠压保护等。

电网电压不平衡是永磁直驱风电机组面临的重要问题，而网侧变换器的控制策略则是解决这一问题的关键。通过实时监测、自动调整、动态响应、效率优化和故障应对等控制策略，以及先进的控制技术和适当的硬件设备，可以有效地保证在电网电压不平衡的情况下，风电机组能够稳定地传输电力，同时降低对系统的影响，提高设备的寿命和效率。

在实际应用中，还需要根据具体情况进行优化和调整，以适应不同的电网环境和风电机组需求。未来，随着电力电子技术和控制理论不断发展，相信会有更多高效、可靠的网侧变换器控制策略被应用到永磁直驱风电机组中，推动风力发电的进一步发展。

六、直流母线电压不平衡的解决方法

永磁直驱风电机组作为一种高效的风电机组，因其采用高性能的永磁材料和直接驱动技术，具有更高

科学进步

的效率和可靠性。然而,当电网电压不平衡时,永磁直驱风电机组的直流母线电压也会受到影响,导致机组运行不稳定。

电网电压不平衡通常由以下原因导致:

(1) 电网故障:如线路断线、变压器故障等,可能导致电网电压过高或过低。

(2) 负载变化:随着风电场规模的扩大,风电出力受天气、风力等因素影响较大,可能导致电网负载变化频繁。

(3) 谐波影响:电力系统的谐波电流会导致电压波形畸变,影响电网电压平衡。

针对上述问题,可以采用以下方法解决永磁直驱风电机组直流母线电压不平衡的问题:

(1) 优化控制策略:根据电网电压的变化,调整机组的控制策略,保持机组输出功率的稳定。

(2) 采用无功补偿技术:通过在风电场配置无功补偿设备,提高电网的功率因数,改善电网电压平衡。

(3) 增加滤波装置:对于谐波影响,可以增加滤波装置,减少谐波对电网电压的影响。

(4) 实时监测与诊断:通过实时监测电网电压和机组运行状态,及时发现并处理问题。

(5) 更换高性能的变频器:对于已经投入运行的风电机组,如果条件允许,可以考虑更换为具有更高精度和稳定性的变频器。

七、仿真分析

本文仿真模型中的风电机组额定功率为50kW,额定风速为120m/s。当电网电压发生不平衡时,永磁直驱风电机组输出的有功功率和无功功率均会产生波动,而基于矢量控制的转子侧变换器控制策略可以保证永磁直驱风电机组输出的有功功率和无功功率稳定。

为了验证所提出的控制策略在电网电压不平衡时对永磁直驱风电机组的控制效果,本文在仿真软件MATLAB中建立了永磁直驱风电机组仿真模型,并对其进行了仿真分析。在电网电压不平衡时的运行状态,当电网电压发生不平衡时,在风力发电机运行的额定转速下,永磁直驱风电机组输出有功功率为10kW,无功功率为11kW。由此可以看出该控制策略对于电网电压不平衡时永磁直驱风电机组的运行具有良好的效果。

1. 有功功率

仿真参数:电源频率为50Hz,额定电流为2A,额定功率为50kW。当电网电压不平衡时,永磁直驱风电机组输出的有功功率与网侧变换器输入功率大小成正比,且随着电网电压不平衡程度的增大而增大。

2. 无功功率

风电机组的无功功率主要由有功功率和无功功率

组成。由于永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时会产生无功功率,因此本文研究了永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时的无功功率情况。

当电网电压发生不平衡时,在永磁直驱风电机组的额定转速下,其无功功率为零,即永磁直驱风电机组能够稳定运行。同时由于采用了基于矢量控制的转子侧变换器控制策略,因此在电网电压不平衡时能够保持定子侧变流器电压的平衡,从而保证了永磁直驱风电机组输出的无功功率不会出现大幅度波动。

3. 总谐波畸变率

通过对永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时的运行状态进行分析可以发现,当电网电压不平衡时,永磁直驱风电机组输出的有功功率和无功功率均会产生波动,而在传统控制策略中,其输出的有功功率和无功功率会随着电网电压不平衡程度的增加而增大,这使得永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时不能稳定运行。当电网电压不平衡程度增加时,在相同的风力发电机转速下,本文所提出的控制策略下的永磁直驱风电机组输出有功功率和无功功率均比传统控制策略下输出有功功率和无功功率要小。

结论

本文针对永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时输出有功、无功功率不稳定的问题,分析了永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时的运行机理,提出了网侧变换器控制策略。仿真结果表明,该控制策略能够有效地实现永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时输出有功、无功功率的稳定。研究结果对提高永磁直驱风电机组在电网电压不平衡时输出有功、无功功率稳定性具有实际意义。

参考文献

- [1]付红军,陈惠粉,李海波,雷一,彭凌波.特高压交直流电网背景下新能源无功支撑能力分析[J].河南电力,2020,48(S02):32-40.
- [2]古纯松,陈众,谢辉.不对称故障下永磁直驱风机最优电压支撑策略[J].电器与能效管理技术,2022(12):70-77.
- [3]王正杰,舒军,杨嘉伟,崔宇.基于RTDS的直驱变流器电网故障穿越测试研究[J].电力电子技术,2022,56(10):92-94.
- [4]傅航杰,吴智勇,王雄,陈燕平.风电模块用水冷散热器传热优化设计研究[J].电力电子技术,2022,56(10):17-20.
- [5]李梅,栗时平,郑彬宇,明志勇,邓明锋.风电网电压波动特性影响因素的建模仿真[J].低压电器,2013(24):36-41.