

电力系统故障下风电机组的暂态响应特性研究

田永昌

内蒙古龙源蒙东新能源有限公司 内蒙古赤峰 024000

摘要: 电力系统故障对风电机组的暂态响应特性具有重要影响, 故障类型、持续时间及位置对机组稳定性和恢复能力产生显著作用。通过优化控制策略、调整机组结构参数及采用辅助设备, 可以有效提高机组的故障穿越能力和响应性能。

关键词: 电力系统故障; 风电机组; 暂态影响特性

引言

电力系统故障对风电机组的暂态响应特性产生显著影响, 尤其在故障期间, 风电机组的稳定性和故障穿越能力至关重要。深入研究风电机组在不同故障条件下的动态响应特性, 不仅有助于提高机组的可靠性, 也为优化风电并网提供理论支持。

一、风电机组的类型及工作原理

1. 不同类型风电机组概述

风电机组根据工作原理与结构的不同, 通常可分为定速风电机组、双馈感应风电机组 (DFIG) 和永磁直驱风电机组三大类^[1]。

(1) 定速风电机组

定速风电机组是一种较为传统的风电机组, 其主要特点是转子与电网之间的连接保持恒定转速。这类机组的工作原理相对简单, 风力机组的转子通过齿轮箱与发电机相连, 保持一定的转速输出电力, 适用于风速相对稳定的地区。尽管定速机组的控制方式较为单一, 因其结构简单、维护方便, 仍在一些小型风电项目中得到应用。

(2) 双馈感应风电机组 (DFIG)

双馈感应风电机组 (DFIG) 则是近年来应用较为广泛的一种机型。其基本结构包括定子、转子和变频器。定子的作用是将机械能转化为电能, 而转子则通过变频器控制与电网的连接, 使转速在一定范围内变化, 从而能够更好地适应不同的风速。这种结构使得DFIG具备较强的适应性和稳定性, 特别是在风速波动较大的区域, 能够保持较为稳定的功率输出。基于矢量控制的运行原理使得该机组能够精确控制电流的方向与幅值, 进一步提升了发电效率和电能质量。

(3) 永磁直驱风电机组

永磁直驱风电机组采用了磁路结构与永磁材料相结

合的设计, 取消了传统的齿轮箱, 转子直接驱动发电机。永磁材料的应用提高了机组的功率密度与稳定性, 尤其是在低风速时, 能够有效提高启动扭矩。该机组的工作方式具有显著优势, 尤其是在减少机械损耗、降低维护成本方面表现突出。

2. 正常运行时各类型风电机组的电气特性

在正常运行时, 不同类型的风电机组展现出不同的电气特性。定速风电机组的功率输出主要受风速的影响, 其功率输出与风速成三次方关系。由于转速固定, 该机组的电压和电流在风速变化时保持一定波动, 系统难以实时调节, 因此在风速变化较大的地区, 其电气稳定性较差^[2]。

与定速机组不同, 双馈感应风电机组能够在一定范围内调节转速, 因而其功率输出较为平稳。由于变频器的应用, DFIG能够实现对电压和电流的实时调控, 从而有效应对风速波动, 保证电力输出的稳定性。这种机型的电气特性使其在大规模风电场中得到了广泛应用, 尤其适用于风速不稳定的地区。

至于永磁直驱风电机组, 其电气特性则更加稳定。由于没有齿轮箱的损耗, 其功率输出更加直接且高效, 电压和电流的波动较小。通过永磁同步发电机的直接驱动方式, 该机组在低风速情况下也能维持较高的效率, 且具备较好的负载适应性。其电气特性使其特别适用于对稳定性要求较高的风电场。

二、电力系统故障类型及其对风电机组的影响机制

1. 常见电力系统故障类型

在电力系统中, 常见的故障类型包括短路故障、电压跌落与骤升, 以及频率波动。短路故障可分为三相短路、两相短路和单相接地短路等多种形式。三相短路是最严重的一种, 通常会导致电流剧增并对系统造成重大冲击。两相短路和单相接地短路虽然对系统的影响较三

相短路轻,但依然会造成电压的不稳定,从而影响整个电力系统的稳定运行。电压跌落和骤升的现象,通常发生在电网负荷突然变化时,这种波动会使风电机组的电气系统面临突发的压力。频率波动则是指电网频率的波动,通常由于负荷突变或发电机组失去同步所致,这种波动会影响风电机组的电能输出与电气稳定性^[3]。

2. 故障对风电机组机械部分的影响

电力系统的故障对风电机组的机械部分也有明显影响。转速变化是常见的机械部分响应。由于电力系统发生故障时电网频率会波动,风电机组的转子转速会受到影响。对于定速风电机组,转速变化会导致发电效率的下降,甚至可能引发机组的失效。对于双馈感应机组和永磁直驱机组,转速变化的影响较小,但仍会影响到机械负载的平稳性。而轴系扭矩波动是另一种影响。电网故障引起的电流和电压变化会导致风电机组负载发生剧烈波动,进而影响到机组的轴系扭矩。尤其是在风速较大时,轴系的扭矩波动可能会加剧机械部件的磨损,影响机组的长期稳定性,甚至导致过度振动或损坏。

3. 故障对风电机组电气部分的影响

在电力系统发生故障时,风电机组的电气部分通常会遭遇较大的冲击。具体而言,定子和转子电流的突变是最常见的电气影响。由于短路故障或电压波动,机组的定子和转子电流会发生剧烈变化,可能导致电气设备过载甚至损坏^[3]。特别是在短路故障发生时,电流的急剧上升容易造成变流器和控制系统的保护动作,从而影响风电机组的正常发电。

与此同时,电压波动对变流器的冲击也不容忽视。变流器是风电机组与电网连接的关键部件,其作用是将风电机组产生的交流电转换为符合电网标准的电能。电压的剧烈波动会导致变流器工作异常,可能出现过电压或欠电压保护动作,严重时会造成变流器损坏,从而影响机组的发电能力。

此外,无功功率和有功功率的变化是电力系统故障对风电机组电气部分影响的重要表现。电网电压波动会导致风电机组的无功功率需求增加,若机组不能及时调整电网电压,将导致电力输出不稳定,甚至使风电机组脱网或停机,降低风电场的整体发电效益。

三、风电机组暂态响应模型

1. 定速风电机组暂态模型

定速风电机组的暂态响应模型主要依赖于电磁暂态的数学描述。在这一模型中,风机的转速保持恒定,而其发电机的电磁暂态行为则受到风速波动和负载变化的影响^[4]。基于电磁暂态分析,定速风电机组的数学模型

通常包括定子绕组电压、电流与磁通之间的耦合关系。通过对发电机端电压、电流及磁场的变化过程进行时域仿真,可以获得风机在负载扰动、风速变化等因素作用下的响应特性。模型参数的确定方法则主要通过实验数据与仿真模型比较,采用最小二乘法等优化手段进行标定,从而确保模型的准确性与实用性。

2. 双馈感应风电机组暂态模型

双馈感应风电机组(DFIG)由于其变频控制的特性,暂态响应模型较为复杂。该模型需考虑定子和转子磁链方程、电路方程的完整耦合,反映了转子电流与定子电流之间的相互作用及其对电网的影响^[4]。在变频器控制系统的建模中,控制器通过调节转子电流的幅值与相位,来实现对风电机组输出功率的调节。该模型不仅要精确描述风机的电磁暂态特性,还应当包括变频器和控制系统对风电机组运行状态的影响。在实际应用中,通过对双馈感应机组暂态响应的仿真分析,可以评估其在风速波动或电网故障等情况下的动态性能与稳定性。

3. 永磁直驱风电机组暂态模型

永磁直驱风电机组采用永磁体提供激励,避免了传统励磁系统的复杂性。在其暂态模型中,永磁体磁场特性对机组响应起着重要作用。在实际建模中,永磁体磁场的非线性特性需要通过精确的磁场分析来描述,以反映其在负载变化或风速波动时对机组电流与电压波动的影响。此外,发电机与电网接口处的模型处理尤为关键,主要考虑电网侧的电压波动及其对机组暂态特性的反馈作用。在具体仿真时,电网侧模型通常包括电力电子设备与电网的交互作用,通过这些细节的建模,能够更真实地反映永磁直驱机组在不同运行工况下的动态行为和响应特性。

四、风电机组暂态响应特性分析

1. 不同类型故障下的暂态响应特性

风电机组的暂态响应特性受到多种因素的影响,其中故障类型、故障持续时间和故障点位置是关键变量。在三相短路故障的情况下,风电机组通常会经历电流、电压和功率的急剧变化^[5]。例如,在双馈感应风电机组中,短路故障可能导致电流峰值剧增,电压迅速下跌,功率输出发生显著波动。不同机型在面对相同类型故障时,其响应的差异与机组的控制策略密切相关。定速风电机组因其转速固定,在故障发生时难以迅速调整输出功率,从而可能导致较长时间的功率恢复期。而永磁直驱风电机组的响应则较为灵敏,因为其直接驱动的结构使得功率波动较小,恢复速度较快。

此外,在故障持续时间和故障点位置变化的情况下,不同风电机组的暂态响应特性也会有所不同。例如,故

障点靠近机组时，电流的变化可能更加剧烈，对机组造成的影响也更加显著。反之，远离机组的故障点则可能导致功率恢复的延迟。因此，故障点的选择和持续时间长短直接决定了风电机组在暂态过程中的稳定性和恢复能力。

2. 不同类型风电机组的暂态响应特性比较

在相同故障条件下，定速风电机组、双馈感应风电机组和永磁直驱风电机组的暂态响应特性存在显著差异。定速风电机组因其转速无法调节，故障发生后需依赖电网恢复其运行状态，因此在故障期间表现出较低的功率恢复能力。相比之下，双馈感应风电机组具备较强的调节能力，能够通过调节转子电流实现转速的调节，从而较快恢复功率输出。永磁直驱风电机组在暂态过程中具有明显的优势，其直接驱动的结构能够保证更快速的响应，且无需复杂的机械传动系统，功率恢复较为迅速。

从转速调节能力来看，双馈风电机组由于其变速特性，能够在较短的时间内调整至适应故障后的工作状态，因此在暂态过程中的表现优于定速机组。而永磁直驱风电机组则在这一方面与双馈机组相当，甚至在故障持续时间较短时，能够更快速地恢复到正常状态。

3. 暂态响应中的关键因素分析

风电机组的控制策略是影响暂态响应的关键因素之一。例如，双馈感应风电机组的矢量控制策略能够在发生故障时迅速调节转速和功率输出，减轻故障对机组的影响。矢量控制通过精确控制转子电流，使得机组能够维持较好的动态性能，降低故障对机组电气设备的冲击^[5]。

此外，机组自身的参数，如转动惯量和电抗，也在暂态响应中起着重要作用。较大的转动惯量有助于平稳应对暂态扰动，减缓转速变化，减少系统不稳定性。电抗的大小则影响到电流波动的幅度，较大的电抗会导致电流变化更加剧烈，从而影响功率的恢复速度。因此，优化机组参数，合理设计控制策略，对于提升风电机组在暂态响应中的表现具有重要意义。

五、抑制风电机组暂态不良响应的措施

1. 改进控制策略

风电机组的控制策略直接影响其在故障情况下的暂态响应特性。为提高风电机组的故障穿越能力，近年来，研究人员提出了多种先进控制算法。例如，双馈感应风电机组在传统矢量控制基础上，采用了基于模型预测控制（MPC）的方法。MPC通过预测未来系统状态，实时调整控制量，使得机组能够更迅速、精准地响应系统扰动，显著提高了机组在暂态过程中的稳定性。此外，基于状态观测器的控制方法也被提出，用于监测机组运行状态并进行动态调整，从而减少故障对机组性能的影响^[5]。

2. 优化风电机组结构和参数

除了控制策略的改进，风电机组的结构和参数调整也是提升暂态响应的重要手段。从机械结构方面考虑，增大机组的转动惯量能够有效减缓转速的剧烈波动，减少故障发生时对机组的冲击。转动惯量较大的机组在遭遇短时间故障时，能够保持较为平稳的运行状态，减少机组停机的风险。在电气参数方面，适当调整机组的电抗可以改善电流波动，减小系统中电气冲击的幅度，从而提升功率恢复能力。例如，降低定子电抗或采用更低电抗的电气设计，有助于提升机组在故障时的响应速度和稳定性。

3. 采用辅助设备

为了有效减轻风电机组在暂态过程中的不良响应，储能装置的应用越来越受到重视。蓄电池和超级电容器等储能设备可以在风电机组发生故障时提供额外的电能支持，维持系统的电压和功率稳定。特别是在短时波动或频繁起伏的故障情况下，储能装置能够快速释放能量，缓解电网压力，提升机组的故障穿越能力。这些辅助设备不仅能在风电机组发生暂态故障时提供电能支持，还能够减少因故障引发的机组停机时间，进而提升整个风电场的可靠性和运行效率。

结语

综上所述，风电机组的暂态响应特性研究对于提升风电系统的稳定性和故障穿越能力具有重要意义。通过优化控制策略、调整机组结构及参数、引入辅助设备等措施，可以有效抑制不良响应，增强机组的适应能力。随着技术进步，这些方法将在未来风电并网过程中发挥更大作用，推动可再生能源的稳定利用。

参考文献

- [1] 杨晓初, 王冠文, 罗国甘. 双馈风电机组故障电磁暂态响应特征提取研究[J]. 电气传动, 2023(09): 81-87.
- [2] 胡峰. 双馈风电机组故障分析及对电力系统暂态稳定性影响研究[J]. 科技创新导报, 2020(11): 21-22.
- [3] 杨皎才, 余建峰, 欧阳金鑫. 电网故障下永磁直驱风电机组机电暂态全过程等值建模方法[J]. 电动电能新技术, 2021(05): 22-33.
- [4] 刘洪波, 于汉清. 含双馈风机接入的电力系统送端暂态稳定性研究[J]. 电气自动化, 2024(01): 14-19.
- [5] 杨楠, 崔伟, 王智伟等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器, 2020(02): 142-149.