

[风电场]

电力系统中风电发电波动的动态补偿控制方法研究

文/刘春雪¹ 黄光球^{1,2}

1. 广西电力职业技术学院; 2. 国家能源集团广西电力有限公司

深入探讨一种通过引入变速泵储能系统来优化风电场功率波动管理的方法。此方法特别强调利用定子磁链间接磁场定向控制 (IFOC-SF) 策略对泵储能系统的精准控制, 以实现高效能运作和响应速度的提升。为在变流器侧产生所需的6 kV电压, 并确保系统的高效运行, 研究中采用两个完全相同的七级级联H桥多电平转换器 (CHB-MLC) 进行级联连接。应用比例积分 (PI) 控制器来检测风力条件的变化, 并据此调整变速泵储能系统的参考速度。最终, 所提出的模型设计用于改善某风电场的功率波动情况。通过对该地区特定条件下的风电波动特征进行分析与建模, 验证变速泵储能技术结合先进的控制策略对于提高可再生能源利用率、增强电网稳定性的巨大潜力。这一研究成果为解决风电间歇性带来的挑战提供一个可行的技术路径, 同时也为类似地区的风电开发提供重要的参考。

随着越来越多的可再生能源并入电网, 其随机性和间歇性使储能成为电网控制和运行的关键需求^[1]。电池、泵储等能量密度、功率密度和寿命不同的储能技术已应用于电力系统。在全球范围内, 已经有关于上述储能技术的实验和示范项目。然而, 蓄能被认为是电网级电力运行控制中唯一实用的方法, 具有商业潜力。

虽然蓄能已经使用了100多年, 但其容量、控制策略和应用等性能一直在不断变化。近几十年来, 电网中的冲击性负载和风能等可再生能源的数量有所增加。因此, 蓄能的响应速度对电网越来越重要。随着可逆混流式水轮机制造技术和电力电子技术的发展, 变速蓄能技术自20世纪90年代以来得到显著提高。

通常, 变速蓄能的励磁和调节系统是基于电力电子设备的变流器, 具有容量大、电流控制快、励磁系统过电压抑制、机组平稳启动和高可靠性等特点

点和要求, 相当于高压直流电。基于晶闸管或GTO的电流源变流器和电压源变流器是控制性能、价格和安装空间不同的实用设备。到目前为止, 用于蓄能的电力电子转换器分为循环转换器、两级背靠背转换器和三级背靠背转换器。

磁场定向控制 (FOC) 也称为矢量控制, 是一种用于大功率中压驱动器的控制技术。FOC策略将用于泵储能控制。H桥级联多电平变流器已广泛应用于中容量变频驱动, 但这种拓扑结构对于变速泵储能来说是新的。该拓扑结构具有泵储应用的一些特点, 如出色的输出波形和连续的频率调节。本文将采用H桥多电平变流器进行变速变流器设计, 还将为风电波动动态补偿设计外环反馈控制。通过PI控制检测和调整风力的变化, 以产生参考速度; 通过控制蓄能器的速度来平衡主电网的综合电力; 通过演示网络模拟所提出策略的有效性。最后, 该模型用于改善某风电场的功率波动。

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2022KY1340)

间接磁场定向控制与变换器拓扑

变速泵蓄能控制系统的电网侧通过移相变压器连接到H桥变频器的整流器。因此，它与使用定子电压定向控制（SVOC）来构建模型是一致的。在该模型中，电磁转矩可用于控制泵储能的速度。

用于控制转子侧的H桥级联多电平变流器配置的7级CHB变流器的两个相同单元级联连接，其特征包括：①成本低，易于维修；②接近正弦的输出和线路电流波形；③改进系统可用性的旁路功能；④低THD；⑤没有串联开关器件的高压，以产生高交流电压；⑥如果变流器和驱动器之间的距离很长，它们在交流驱动端子上没有过电压。每个电源单元产生490 V。该拓扑由CHB转换器和移相变压器组成。移相变压器为电源单元提供隔离电源，提高线路电流的THD，以及公用事业和转换器之间的分离，以缓解共模电压。同相配置脉宽调制（IPD PWM）设计用于为全桥逆变器侧产生开关信号。

对于级联H桥转换器的任何两个相同的7级，移相变压器的任何相位之间的角度为 20° 。移相变压器的次级绕组连接到功率电池的整流器侧。它与七级CHB转换器的上下结构（Z-2、Y、Z-1）相连。该模型的任何7个电平的脉冲都是18脉冲整流器。

功率波动动态补偿控制

变速泵蓄能对风电波动动态补偿的效果在很大程度上取决于两个系统的动态时间响应特性。该特性可以通过频域中带宽之间的关系来确定。以下基于对风电波形频谱特征和变速蓄能带宽的分析，表明变速抽水蓄冷对风电波动动态补偿的有效性。本节还设计了缓解风电波动的控制策略。

1. 风电波动的频谱特征

由于风速和风向的随机变化，风速具有随机性和间歇性。风电场的功率输出也受到塔影、风切变和偏航误差的随机影响。

人们普遍认为风由四部分组成，基本风、渐变风、阵风和随机风。风的成分在不同地区和季节都在变化，具有一定的随机性。对于风电功率随时间变化的记录，可以在不同的周期内进行傅里叶分析，得到风电功率波动的频谱特征。风电场记录的典型风电波动的频谱特征如图1所示。周期0 h，这

里的频谱密度值为2 m/s，表示平均风速或某种基准风速。由于周期为0在实际物理意义上不存在，这个值用于表示一个参考点或起始值。随着周期的增加，风电频谱密度呈现波动性的变化。这意味着风速的波动在不同的时间尺度上有不同的强度。例如，在周期为10 h、20 h、30 h和55 h等处，频谱密度相对较高，表明在这些时间尺度上风速的波动较强。

图1中出现了多个峰值和谷值。例如，在周期为30 h时，频谱密度达到最大值6.826 47 m/s，而在周期为15 h、25 h和45 h等处则出现相对较低的值。这些峰值和谷值反映了风速波动的特定模式或周期性行为。虽然图1中的数据点有限，但可以观察到风电频谱密度在较长周期（如 >50 h）时趋于较低值。这表明在长期尺度上，风速的波动趋于平缓。

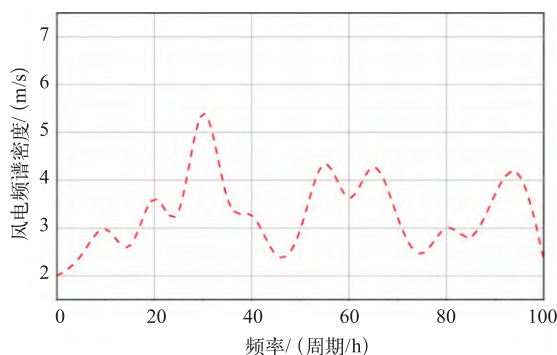


图1 频谱特性

统计数据显示，典型的风电波动频率从几分钟、一天到5天左右不等。对于每天缓慢的波动，电网有足够的调节手段，但对于每分钟的波动，仅靠火力发电和其他传统手段很难进行调整。变速泵蓄能是一种选择。

2. 变速泵蓄能系统的频谱特性

变速泵蓄能系统包括信息处理系统、电力电子转换电路发电机和泵系统。信息处理系统和电力电子转换电路具有快速的动态响应和较小的时间常数，后两者可以忽略不计。然而，后两者的动态特性与系统结构和控制方法密切相关，因此很难通过分析方法得到具体值。通过对典型响应曲线的Prony分析，可以获得其频谱特征。

当将有功功率波动作为一阶系统响应时，可以通过Prony辨识得到系统频域传递函数为

$$H(j\omega) = (j\omega\tau + 1)^{-1} \quad (1)$$

式中, τ 在3~5 s之间。

变速泵储能的带宽覆盖了风脉动的带宽, 满足风脉动抑制对时间响应特性的要求。

3. 变速泵蓄能控制系统抑制风电波动

图2直观地展示了变速泵储能抑制风电波动控制系统的整体框图。在这个系统中, 各个组件协同工作, 以实现风电波动抑制。首先, p_{set} 作为系统的设定值, 通常保持在一个恒定的范围内。这个设定值代表系统期望达到的稳定输出功率或储能状态。在实际应用中, p_{set} 的值根据电网需求、天气预测和风电场的具体情况进行调整。接下来, f_{PWM} (脉宽调制频率) 在系统中扮演着至关重要的角色。它是相应PWM (脉宽调制) 触发脉冲的最终形式和所需频率。PWM技术通过调整脉冲的宽度和频率, 从而精确地控制变速泵和蓄能装置的工作状态。在变速泵蓄能控制系统中, f_{PWM} 的调整能够实现对储能装置充放电速率的精确控制, 进而平滑风电输出的波动。

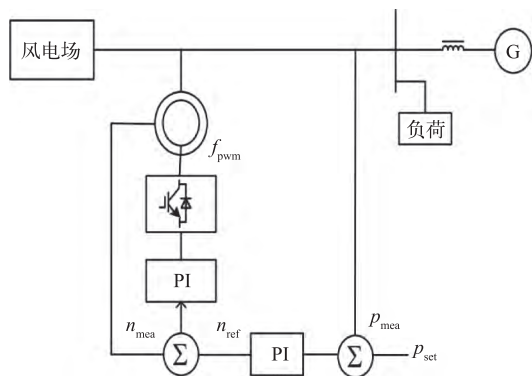


图2 变速泵蓄能抑制风电波动控制系统框图

具体来说, 当风电输出功率高于设定值 p_{set} 时, 系统会触发PWM信号, 使变速泵以较高的转速运行, 将多余的电能转化为机械能, 并通过蓄能装置储存起来。这一过程中, f_{PWM} 的调整确保变速泵能够高效地吸收多余的电能, 并将其转化为稳定的储能形式。相反, 当风电输出功率低于设定值 p_{set} 时, 系统会调整PWM信号, 使变速泵以较低的转速运行或甚至反转, 释放蓄能装置中储存的能量, 以补充电网需求。同样地, f_{PWM} 的调整在这一过程中起到了关键作用, 确保蓄能装置能够按需释放能量, 以维持电网的稳定运行。

仿真实验

PSIM用于构建和模拟整个系统, 包括基于间接磁场定向控制的变速蓄能控制、风电场功率波动和级联H桥多电平变流器。

发电机和变速电机的功率由下式计算

$$P_{Generator} = P_T - P_J \quad (2)$$

$$P_{Motor} = P_p + P_J \quad (3)$$

式中, $P_{Generator}$ 为发电机的输出功率; P_{Motor} 为电动机的输入功率; P_T 为涡轮机的功率输出; P_p 为泵的功率输入; P_J 为转子的电功率。

为说明如何在PSIM中增加风电场的功率波动, 选择时间段模拟为2 s。该电站是柴油发电机和风力发电机相结合的风柴油混合动力电站类型。这种类型用于增加容量, 降低柴油发电机的成本和发电对环境的影响。另一方面, 本文提出的系统 (变速泵储能风力涡轮机) 在成本、燃料消耗和污染方面优于其他系统。

本文提出, 通过在风力涡轮机上使用变速泵蓄能可以改善风力发电的波动。此外, 这种类型 (风力变速蓄能) 具有以下特点: 水的势能相对稳定, 需要时可以通过将其沉淀到蓄能器中来发电; 该组合被描述为与未连接到较大网格的地方特别兼容。

风电场和电力转子的功率波动如图3所示。使用变速蓄能后负载的功率发生了变化。由PSIM软件测量并与风电场功率进行比较的功率是电动转子功率。从图3可以看出, 风电场功率在观察期间有显著波动, 从最低的1.016 MW到最高的10.560 49 MW。功率的波动受到多种因素的影响, 如风速的变化、风向的改变和风电场设备的运行状况等。在某些时间点 (如0 h、1 h和3 h等), 风电场功率较低, 对应于风速较低或风向不利于风力发电的时段。而在其他时间点 (如4 h、6 h和10 h等), 风电场功率较高, 对应于风速较高且风向适宜的时段。

由图3可知, 蓄能电动机转子功率也随时间有显著波动, 但波动范围相对较小, 从最低的0.5 MW到最高的3.902 94 MW。转子功率的波动受到风电场功率的影响, 因为蓄能电动机通常用于平滑风电场输出的波动, 储存多余能量并在需要时释放。在风电场功率较高的时段, 蓄能电动机转子功率也相对较高, 正在储存能量; 而在风电场功率较低的时段, 转子功率较低, 甚至处于放电状态以补充电网需求。

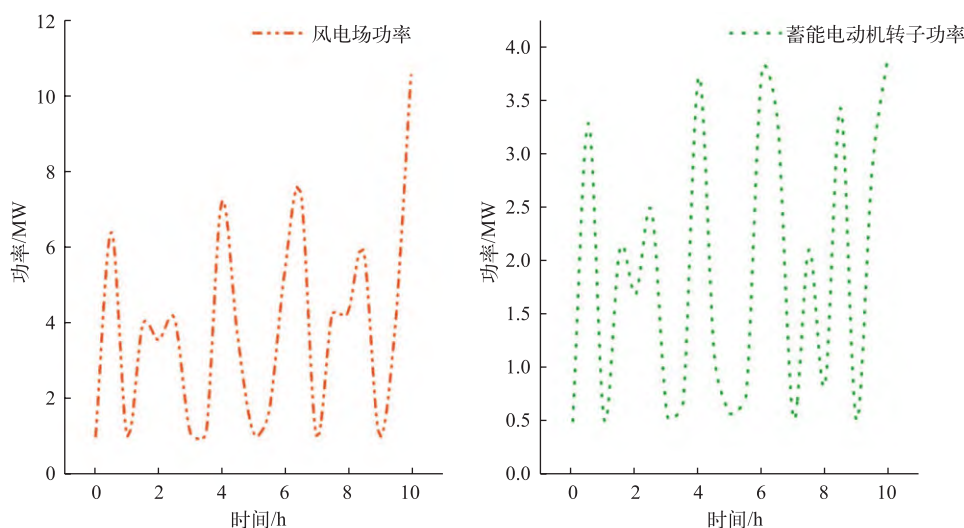


图3 风电场功率波动与电转子功率

从图3可以看出，风电场功率和蓄能电动机转子功率的变化都与时间有一定的相关性。例如，在风电场功率较高的时段（如4~6 h、8.5~10 h），蓄能电动机转子功率也相对较高；而在风电场功率较低的时段（如0~1 h、3~5 h），转子功率也相对较低。

这些数据对于风电场和蓄能电动机的运行管理具有重要意义。通过分析这些数据，可以优化风电场和蓄能电动机的运行策略，提高能源利用效率，减少能源浪费。此外，这些数据还可以用于预测风电场输出功率和蓄能电动机转子功率的变化趋势，为电网调度和能源管理提供决策支持。需要注意的是，这些数据受到多种因素的影响，如天气条件、设备状况和运行策略等。因此，在应用这些数据时需要考虑这些因素对结果的影响，并结合实际情况进行分析和判断。

子电压场定向控制策略，这种控制方法具有动态响应快、控制准确度高特点，能够确保变速泵储能在不同工况下的高效运行。通过将变速泵储能系统与风电场相结合，不仅可以实现对风电功率波动的快速响应，还能在电网负荷较低时利用多余的风电进行储能，在负荷高峰时通过水力发电释放能量，从而实现能源的有效调度和利用。增加变速泵储能后，风电场输出功率的波动得到显著改善，功率曲线更加平稳，有助于提升风电并网的质量和电网的整体稳定性。利用电力电子仿真软件PSIM对整个系统进行详细的建模与分析。仿真结果不仅证明H桥级联多电平变流器在功率转换中的优越性能，还验证定子电压场定向控制策略在蓄能系统中的可行性和高效性。这些研究成果为风电场功率波动问题提供一种创新且实用的解决方案，具有重要的工程应用价值。EA

（收稿日期：2025-04-08）

结束语

为解决风电场功率波动问题，采用一种基于H桥级联多电平变流器的变速泵储能模型。该模型通过引入蓄能系统，能够有效动态补偿风电场因风速变化而引起的功率波动，从而提高电网的稳定性和可靠性。在控制策略上，蓄能系统的运行采用定

参考文献

- [1] 赵靖英, 乔珩埔, 姚帅亮, 等. 考虑储能SOC自恢复的风电波动平抑混合储能容量配置策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5206-5219.