基于转子动能与分布式储能的双馈风机 频率控制策略

蔡玮良,程海锋,潘智轩,程进,戴明利

(上海勘测设计研究院有限公司,上海 200335)

摘要:双馈风电机组(DFIG)并网导致系统等效惯量降低、一次调频能力下降,随着风机并网规模增加,系 统面临的调频问题愈发严重。针对此问题,提出了基于转子动能与分布式储能的DFIG调频控制策略。通过 对转子动能调频能力定量分析,确定将转子动能和分布式储能装置共同作为支撑DFIG变流器调频的能量源, 使其分别响应频率变化率和频率偏差量,提供惯量支撑和一次频率调节,既能有效避免频率二次跌落现象发 生,也能充分利用DFIG自身能量,降低分布式储能装置容量。之后从功能作用和功率适配度方面对分布式储 能装置进行容量配置,并将所提方案经济效益与超速减载策略进行对比,计算发现所提方案年均投资成本远 小于超速减载策略经济损失。最后在 Matlab 仿真系统和风电机组实验平台分别进行验证,实验结果表明所提 方案能有效响应系统频率波动,为电网提供动态有功支撑。

关键词:双馈风电机组;分布式储能装置;转子动能;频率调节 中图分类号:TM614 文献标识码:A DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqcd24619

Frequency Control Strategy of DFIG Based on Rotor Kinetic Energy and Distributed Energy Storage

CAI Weiliang, CHENG Haifeng, PAN Zhixuan, CHENG Jin, DAI Mingli (Shanghai Investigation Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: The grid connection of doubly-fed induction generator (DFIG) leads to the reduction of system equivalent inertia and primary frequency regulation capacity. With the increase of DFIG grid connection scale, the problem of system frequency regulation becomes more and more serious. In view of this problem, frequency control strategy of DFIG based on rotor kinetic energy and distributed energy storage was proposed. Through the quantitative analysis of rotor kinetic energy's frequency regulation ability, it was determined that rotor kinetic energy and distributed energy storage device were jointly used as the energy source to support DFIG converter frequency regulation, so that they can respond to the frequency change rate and the frequency deviation respectively, provide inertia support and primary frequency regulation. The strategy can not only effectively avoid frequency secondary drop phenomenon, but also make full use of DFIG energy and reduce the distributed energy storage device's capacity. After that, the capacity of distributed energy storage device was configured from the aspects of function and power adaptation, then the economic benefits of the proposed scheme were compared with the overspeed load shedding strategy. It was found that the average annual investment cost of the proposed scheme is far less than the economic loss of the overspeed load shedding strategy. Finally, the proposed strategy was verified in Matlab simulation system and DFIG experimental platform. The experimental results show that the proposed strategy can effectively respond to system frequency fluctuations and provide dynamic active power support.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); distributed energy storage device; rotor kinetic energy; frequency regulation

在我国的装机容量已经达到了30万 MW^{III},连续

风电作为新能源发电的主力军,到2021年底 12 a保持新增装机容量世界第一。面对如此大规 模的装机容量,风电并网后带来的电力系统安

基金项目:国家自然科学基金(52207102)

作者简介:蔡玮良(1972—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为新型电力系统可再生能源高比例控制,Email:cai_weiliang@ctg.com.cn 通讯作者:程海锋(1985一),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为可再生能源高比例控制,Email;cheng_haifeng@ctg.com.cn

全、稳定问题就显得尤为重要。双馈风力发电机 (doubly-fed induction generator, DFIG)作为风电应 用最为广泛的机型之一^[2],其通过转子侧和网侧 变流器与电网相连,转子转速与系统频率解耦, 通常运行于最大功率跟踪状态^[3]。双馈风力发电 机的传统解耦控制虽实现了风能利用的最大化, 但当电网发生功率波动时,其转子动能被"隐藏"^[4], 无法像常规同步发电机一样为电网提供有功 支撑,导致系统稳定性降低,容易引发频率安全 问题。

针对风机并网带来的调频问题,国内外学者 进行了大量研究,提出了虚拟惯量控制^[5-9]、超速 减载控制[10]和变桨距角控制[11-12]等调频策略。并 且随着近年来储能技术的高速发展,储能装置在 风机调频中也得到了广泛应用[13-17]。实现风电机 组频率调节的关键在于能量或功率。对于双馈 风电机组来说,其调频能量来源主要有两种途 径,一是自身的转子动能或通过减载预留的风 能,另一个则是外界储能装置提供的能量。利用 转子动能的传统虚拟惯量控制策略采用风机转 子动能模拟同步发电机组的惯量响应特性和阻 尼特性,实现风电机组主动提供惯量支撑的功 能,但其能量不足以提供一次频率调节,且在风 机退出惯量支撑时可能存在频率二次跌落的问 题。而超速减载控制策略则是采用减少风机捕获 风能、预留有功功率的方式,该方案满足了一次调 频的能量需求,但由于稳态时部分风能处于弃风 状态,造成大量风能资源的浪费,且在超速减载状 态下风机转速可调节范围变窄,一定程度上也限 制了其一次调频能力。储能装置调频方案既能满 足惯量响应速度的要求,也能实现一次调节的时 长需要,然而其容量与经济投入成正比,完全依靠 储能装置调频会导致容量过大、成本较高。因此, 若能将风、储联合控制,则既能充分利用风机"隐 藏"动能,又能发挥储能装置能量充足的优点,有 效降低储能设备容量,实现发电效益最大化。

基于上述分析,文中在讨论双馈风电机组转 子动能调频潜力后提出基于转子动能与分布式 储能的风机调频控制方案。该方案将转子动能 和分布式储能装置共同作为调频能量来源,利用 风机自身转子动能实现惯量支撑,利用分布式储 能装置提供一次频率调节,通过动态识别系统频 率波动,实现电网对风机主动参与系统频率调节 的要求。同时结合分布式储能装置功能需求及 功率限制对其容量进行配置,既保证了储能系统的最小容量,又减少了系统的经济成本。最后,分别在Matlab/Simulink四机两区域模型和风电机组实验平台对该方案进行仿真实验,验证所提控制策略的可行性。

1 双馈风机转子动能调频能力

当双馈风电机组转子角速度从 ω_{r1} 调节至 ω_{r2} 时,该过程所释放的转子动能 ΔE_k 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta E_{k} &= E_{k1} - E_{k2} \\ &= \frac{1}{2} J \left(\omega_{r1}^{2} - \omega_{r2}^{2} \right) \\ &= \frac{1}{2} J \left[\left(2\pi \frac{n_{1}}{60N} \right)^{2} - \left(2\pi \frac{n_{2}}{60N} \right)^{2} \right] \end{aligned} \tag{1}$$

式中: E_k 为转子动能; ω_r 为转子角速度;n为转子 转速;J为双馈风机转动惯量;N为齿轮箱变比。

由于风机所蕴含转子动能与其初始转速紧 密相关,且不同风速下风机转速不同,转子动能也 相差较大,故需结合实际风速对转子动能进行计 算。以1.5 MW和2 MW双馈风电机组为例^[18-19], 其等效转动惯量分别为7.565 8×10⁶ kg·m²和 14.2×10⁶ kg·m²,风机极对数p=2。设风机最小 转速n=1050 r/min时,代入式(1)即可得到不同 转速下风机所蕴含的转子动能,如表1所示。

表1 1.5 MW 和2 MW 风机转子动能调频能力

Tab.1 Rotor kinetic energy frequency regulation capability of 1.5 MW and 2 MW DFIG

| 双馈风机 转速/ (r·min ⁻¹) | 1.5 MW 风机转子 动能/MJ | 1.5 MW风 机惯量响应 时长/s | 2 MW风 机转子动 能/MJ | 2 MW 风机 惯量响应 时长/s |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 800 | 10.09 | 67.2 | 15.10 | 75.50 |
| 1 650 | 7.65 | 51.0 | 11.40 | 57.0 |
| 1 500 | 5.42 | 36.1 | 8.09 | 40.45 |
| 1 425 | 4.38 | 29.2 | 6.55 | 32.70 |
| 1 395 | 3.95 | 26.5 | 5.95 | 29.75 |
| 1 350 | 3.40 | 22.6 | 5.07 | 25.35 |
| 1 275 | 2.47 | 16.4 | 3.69 | 18.45 |
| 1 200 | 1.59 | 10.6 | 2.38 | 11.90 |

当双馈风电机组以10%额定功率响应系统 频率变化时,可以得到不同转速下风机提供功率 响应的时长。可以看出,当转速在1500 r/min以 上时,风机可以通过降速释放转子动能的方式为 系统提供不少于30 s的功率响应;而对于1.5 MW 风机,当转速低于1425 r/min时,无法满足电网对风 机提供30 s时长的一次调频能量要求,对于2 MW 风机则是转速低于1395 r/min时无法满足一次调 频需求。而无论转速处于何值,1.5 MW和2 MW 风机所含的转子动能均能提供不少于5s的功率 支撑,满足电网对风机惯量响应的要求。因此, 综合惯量和一次调频定位分析以及转子动能定 量分析能够得出,当负荷增加导致系统频率下跌 时,可将双馈风机转子动能作为响应频率变化率 即提供惯量支撑的能量来源。

基于转子动能与分布式储能风机 2 调频控制策略

考虑到利用转子动能的传统虚拟惯量控制 和超速减载控制策略存在的不足,同时结合近年 来储能装置技术的不断成熟以及在风电领域的 广泛应用,提出如图1所示的基于转子动能和分 布式储能双馈风电机组调频控制策略,以解决风 机并网带来的频率调节问题。参考同步发电机 组调频过程中惯量能量来源于转子动能、一次调 频能量来源于锅炉预留蓄热的能量提供方式,文 中将转子动能和分布式储能装置共同作为支撑 风机变流器调频的能量源,利用风机转子动能响 应系统频率变化率,提供惯量功率支撑,有效避 免转速调节过深导致的频率二次跌落现象发生 的同时也能保证惯量响应速度;利用分布式储能 装置响应频率偏差量,提供一次调频能量。在保

证一次调频效果的前提下最大程度减少储能设 备的充放电频率和经济投入。

2.1 风储协调控制策略

对于风电机组的惯量支撑能力,第1节分析了 转子动能在系统产生功率缺额时为电网提供功 率调节的时间,证明无论何种风速其能量均满足 系统惯量响应要求,故文中洗择利用转子动能响 应系统频率变化率,以减少分布式储能装置的容 量配置,降低系统投入成本。与传统虚拟惯量控 制策略不同的是,所提策略仅利用风机自身能量 响应频率变化率,因此转子动能作用时间短、转 速变动幅度小、电磁功率与最大功率跟踪点偏差 少,不会产生因转速过调而引发的频率二次跌落 现象。图2为风机转子动能惯量响应曲线。正常 工况下,双馈风电机组在转速-功率公式的控制下 运行于最大功率跟踪点,即图2中A点。转速-功 率公式为

$$P_{\text{MPPT}} = k_{\text{opt}} \omega_{\text{r}}^{3}$$

 $k_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \frac{C_{\text{p}}}{\lambda^{3}} \rho \pi$

 $\frac{1}{2} \frac{C_{\rm p}}{\lambda_{\rm out}^3}
ho \pi R^5$ 式中:PMPT为最大功率跟踪曲线输出功率;km 为最大功率跟踪曲线系数; ρ 为空气密度;C为 风能转换系数; λ_{uv} 为最佳叶尖速比;R为风机叶片 半径。



其中

Fig.1 Block diagram of DFIG frequency control strategy based on rotor kinetic energy and distributed energy storage

(2)



当负荷增加导致系统功率短缺、频率低于 额定值时,风机向电网输出功率提供惯量支撑。 此时电磁功率参考值由P_{MPPT}变为P_{Botor},电磁功率 增大,机械功率不变,使得电磁转矩高于机械转 矩,在转矩差的作用下转速快速下跌,转子动能 以电磁功率形式输出。由于变流器控制响应速 度在ms级别,惯量响应功率将以较快速度输出, 以阻止频率的快速下跌。直至频率变化率减小 到零时,转子转速开始回升,风机依照 MPPT曲 线恢复至最大功率跟踪点,形成闭环控制,整个 过程中风电机组运行轨迹为A-B-C-D-A。对 于风机惯量调节范围,由于双馈风机转子转速 一般在0.7(标幺值)≤ω≤1.2(标幺值)范围内运 行,表1显示在该区间内风机具有足够转子动能 以电磁功率形式输出提供惯量功率支撑,因此 在负荷增加引发的风机调频中,无需设置转速 限制。

当负荷减少引发频率上升时,双馈风电机组 通过减少有功输出进行惯量响应,在转子动能惯 量控制模块作用下,风机沿曲线*A-E-F-G-A*进 行调节。由于风机无论是在最大功率跟踪区、恒转 速区或是恒功率区,转速ω,均不能超过1.2(标 幺值),因此需设置转速保护限制,即ω_{max} = 1.2ω_n。 *P*_{Reter}表达式为

$$P_{\text{Rotor}} = k_{\text{opt}} \omega_{\text{r}}^{3} + H \frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t}$$
(3)

式中:Af为频率偏差量;H为惯量响应系数。

利用分布式储能装置实现风电机组一次频 率调节,既满足了系统能量需求,也通过充放电 方式实现了对盈余能量的充分利用。分布式储 能装置在风机生产阶段即可安装完成,能够实现 同容量风机统一安装、统一配置,设计和控制更 加简洁,相较于集中式储能设备,其空间占地小、 无需投入土建成本。储能装置种类多样,性能各 有不同,考虑到文中采用分布式储能设备的作用 是模拟同步发电机组锅炉预留蓄热,完成系统的 一次调频功能,而电网调频日内波动次数频繁、 对机组调频速度要求高^[20],结合超级电容器可循 环次数高、响应速度快的优点,文中采用超级电 容器作为一次调频能量来源。

超级电容器安装于双馈风电机组的直流母 线处,通过双向 DC/DC 变换器与直流电容相连, 其能量通过网侧变流器与电网进行交换。当系 统正常运行时,超级电容器不启动;若负荷增加 导致系统能量短缺,超级电容器在 DC/DC 变流器 控制下释放能量;若负荷突减引发功率盈余,超 级电容器则持续充电,吸收盈余功率。触发超级 电容器充放电功能的是系统频率偏差量,当 $|\Delta f| \leq 0.033$ Hz,即频率偏差处于调频死区时,超 级电容器不参与一次频率调节,只有当 $\Delta f >$ 0.033 Hz或 $\Delta f < -0.033$ Hz时,超级电容器才通过 充放电均衡系统能量,调节系统平衡。此外,在 充放电过程中需对超级电容器荷电状态(SOC)进 行监控,防止过充或过放现象发生,一般其SOC 的调节范围在0.2~1(标幺值):

 $\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \\ SOC_{\min} = 0.2(标幺值) & SOC_{\max} = 1(标幺值) \end{cases}$ (4)

式中:SOC_{min}为荷电状态下限值;SOC_{max}为荷电状态上限值。

超级电容器充放电功率P。表达式为

$$P_{e} = \begin{cases} -D\Delta f \mid \Delta f \mid > 0.033 \text{ Hz} \underline{B}SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \\ 0 \qquad \mid \Delta f \mid \leq 0.033 \text{ Hz} \underline{\sigma}SOC = \delta C \\ \end{cases}$$

(5)

式中:D为一次调频响应系数。

综合双馈风电机组频率调节期间转子动能 和分布式储能装置的功能定位,风储协调控制策 略的流程图如图3所示。当频率偏差处于调频死 区时,转子转速和分布式储能装置均不启动。若 频率偏差超出调频死区,系统判定风机转子转速 和储能设备荷电状态是否处于调节范围,然后根 据频率变化率释放或吸收转子动能提供惯量支 撑,根据频率偏差量对储能装置充电或放电完成 一次调频,直至完成系统频率调节,转子转速恢 复至初始稳态值,分布式储能装置也停止充放 电。文中在频率调节过程中增设了调频死区,不 仅有效避免了非故障情况频率波动导致的分布 式储能装置频繁启动,也延长了分布式储能设备 的使用寿命。



图 3 基于转子动能与分布式储能风机调频控制策略流程图 Fig.3 Flow chart of DFIG frequency control strategy based on rotor kinetic energy and distributed energy storage

2.2 分布式储能容量配置

在配置分布式储能装置容量时,不仅要考虑 其功能作用,还需对其输出功率与网侧变流器的 适配度进行分析。首先,分布式储能装置在所提 控制策略中的功能是提供一次调频功率支撑,而 一次调频输出或输入功率大小与系统频率偏差 有关,众多文献表明,功率调节值一般不会超过 机组额定功率的10%,时间为30s。其次,当选定 超级电容器的额定功率为10%P_N时,需分析流入 网侧变流器的功率是否会超出其限值。

流入网侧变流器的功率P_{gsc}由双馈风电机组转子侧输出功率P_{ssc}和超级电容器输出功率P_c两部分组成,P_{ssc}与双馈风电机组的转子转速和转差率s密切相关:

$$P_{\rm gsc} = P_{\rm rsc} + P_{\rm c} \tag{6}$$

$$P_{\rm rsc} = \frac{s}{s-1} P_{\rm e} \tag{7}$$

转子转速的工作范围一般为0.7~1.2(标幺 值),则s在-0.3~0.2(标幺值)之间变化。当转差 率s=-0.3时,双馈风电机组输出功率P。达到额定 值,转子侧输出功率P。。也达到最大。

若双馈风电机组额定功率为2 MW时,流过转子侧变流器的最大功率为461 kW,超级电容器最大输出功率为200 kW,依据式(6),流入网侧变流器功率为661 kW,该值小于某公司网侧变流器

的限值700 kW。因此以200 kW×30 s作为超级电容器能量配置,既满足一次调频能量需求,也能满足网侧变流器功率限制。此外,为了保证网侧变流器的安全可靠,对于已建的风电机组可适当降低超级电容器的输出功率和容量。对于新建的双馈风电机组,可以适当增加网侧变流器的额定功率,避免发生流入网侧变流器的功率超过其限值的现象。

2.3 风储协调频率控制策略经济性分析

相较于超速减载方案,基于转子动能与分布 式储能的风机调频方案正常工况下始终运行于 最大功率跟踪点,减少了弃风造成的经济损失, 并且所提方案对转速调节范围也不再提出限制。 不足之处在于,分布式储能装置的安装增加了投 资成本,但参考相关数据^[21-22],基于转子动能与分 布式储能的风机调频策略仍有较强经济优势。

分布式储能系统的成本投入由储能系统的 初始投资成本 F₁和运行维护成本 F₂两部分组 成^[21],两项成本均与设备的额定功率和额定容量 相关:

$$F = F_{t} + F_{y}$$

= $n_{\perp c}S_{c} + n_{\perp p}P_{c} + n_{\perp pwm}P_{p} + m_{y c}S_{c} + m_{y pwm}P_{p}$
(8)

式中:S_e为分布式储能设备容量;P_p为DC/DC变流 器额定功率;n_{Le}为分布式储能装置的单位容量成 本;n_{Lp}为分布式储能装置的单位功率成本;n_{Lpwn}为 变流器的单位功率成本;m_{y_e}为分布式储能装置的 单位运行成本;m_{x_nwn}为变流器的单位运行成本。

对于分布式储能设备来说,其直接安装于风 电机组直流母线侧,容量小,和风机构成一体,因 此其初始投资成本不包含土建相关费用。表2为 储能系统的成本单价^[22]。

表 2 储能系统成本单价 Tab.2 Cost unit price of energy storage system

| | 1 | 6, | 0 : |
|----------|-------------------------------|-----------------------------------|--|
| 设备类型 | 功率单价/ (元・W ⁻¹) | 容量单价/ [元・(₩・h) ⁻¹] | 维护单价/ [10 ⁻⁵ 元・(W・h) ⁻¹] |
| 超级电容器 | 1.5 | 27 | 5 |
| DC-DC变流器 | 0.3 | - | 5 |

依据式(8)以及表2,文中对基于转子动能与 分布式储能的风机调频策略经济成本和超速减 载策略的经济损失进行了计算,并将两者经济效 益进行对比。以2 MW 双馈风电机组为例,对于 基于转子动能与分布式储能风机调频方案,超级 电容器能量配置为200 kW×30 s时,DC/DC 变流 器额定功率为200 kW,总成本投入为46.5 万元。 由于计算出的初始投资成本为当年一次性投入, 而维护成本为每年投资,为了实现统一并考虑到资 金的时间价值因素,需将初始投资成本按年等值 投资进行折算。考虑超级电容器使用年限为8a, 变流器折旧年限为20a,进行折算后每年需投资 4.91万元。对于超速减载控制策略,当减载率为 10%时,在不限电情况下每年因风能资源浪费造成 的电量损失为93kW·h,电费损失则高达50.1万元。 综合对比表3中经济成本可以得出,基于转子动 能与分布式储能的风机调频策略的成本投入远 小于超速减载方案的年经济损失。

表3 超速减载策略和风储协调策略经济性对比

Tab.3 Economic comparison between overspeed load shedding strategy and wind-storage coordination strategy

| | | | 07 |
|----------|------------------|--------------|--------------|
| 超速减载方案 | 年损失电量/ (kW・h) | 电价/元 | 年经济损失/ 万元 |
| (讽蚁平10%) | 93 | 0.54 | 50.1 |
| 风储协调方案 | 超级电容器成本/ 万元 | 变流器成本/ 万元 | 年平均投资/ 万元 |
| | 34.5 | 12 | 4.91 |

3 仿真分析与研究

3.1 仿真系统模型

文中在Matlab/Simulink系统中搭建了经典四 机两区域模型对基于转子动能与分布式储能的 风机调频策略进行验证。区域1电源由310台 1.5 MW双馈风力发电机和1台装有调速器和励 磁调节器的900 MW同步发电机组构成;区域2 电源由1台900 MW同步发电机组构成。同时, 在两区域内分别安装无功补偿装置C₁和C₂,以提 高系统功率因数,稳定线路电压。根据2.2节对 分布式储能装置的容量配置,对区域1中每台双 馈风电机组的直流母线处均安装容量为 150 kW×30 s的超级电容器,通过DC/DC直流变 换器与风机相连。

文中分别对比了不同风速下发生不同负荷 波动事件时,利用转子动能的传统虚拟惯量控制 策略、超速减载控制策略(减载率10%)和基于转 子动能与分布式储能风机调频策略的响应特性 和调频效果,通过对风机风速和负荷L₁,L₂,L₃的 调节实现了不同工况的仿真。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 负荷突增

中风速(10 m/s)时,设置系统负荷在5 s 时突 增 100 MW,对比分析三种不同控制策略下系统

频率、风机出力和转子转速等参数的变化情况, 如图4所示。由于负荷增加时机组输出功率小于 负荷功率,系统频率会迅速下跌,而三种控制策 略都具有惯量支撑功能,且控制系数H和D相同, 因此频率下降速率几乎一致,频率最低点也均为 49.71 Hz。虚拟惯量控制策略的转子动能无法提 供长期能量支撑,不具备一次调频能力,其稳态 频率偏差最大,为49.78 Hz;超速减载控制策略具 有10%预留功率,能够参与一次调频,稳态频率 偏差有所提升,为49.8 Hz;基于转子动能与分布 式储能策略利用超级电容器提供一次调频,与惯 量支撑能量来源不同,稳态频率偏差进一步改 善,为49.82 Hz。中风速下,三种策略的惯量支撑 能力几乎相同,但基于转子动能和分布式储能策 略的一次频率调节能力更具有优势,稳态频率偏 差最小。



对比转子转速变化,由于超速减载控制策略 是通过增加转子转速来预留有功功率,其稳态下 转速最高,为1.19(标幺值),风机输出功率和风 能利用系数也最小。开始调频后三种策略的转 速均会下降,风电机组输出功率也会增加,仅超 速减载策略是通过风机功率进行一次调频,故其 稳态风机输出功率比负荷突增前有所提高,风能 利用系数也有所增加,而另两种方案稳态时和负 荷突增前风机状态无较为明显变化。此外,对比 发现,即使在增速调频后,超速减载方案的风能 利用系数为0.345,也要远小于基于转子动能和 分布式储能方案的0.38。综合分析,中风速、负 荷突增工况下,基于转子动能和分布式储能方案 在系统频率调节和风力资源利用上均为最优。

低风速(7 m/s)时,设置同样工况,仿真结果 如图5所示。仿真发现,基于转子动能和分布式

14

储能调频策略的频率最低点为49.7 Hz,稳态频率 偏差为49.81 Hz,调频效果比其他两种方案都更 为明显。虚拟惯量控制策略的频率最低点为 49.66 Hz,是三者中最低的,这是由于低风速时双 馈风电机组的转子转速几乎达到最低点,所具备 的可调节转子动能较少,仅响应频率变化率则能 量尚可,若需同时响应频率偏差则能量不足。



虚拟惯量和基于转子动能与分布式储能调 频方案的风机稳态输出功率为0.075(标幺值), 在负荷突增时由于虚拟惯量方案需响应频率偏 差量,其风机输出功率变化量要大于基于转子动 能和分布式储能方案,但由于转速几乎都处于下 限值,因此转子转速和风机功率变化量都较小。 超速减载方案稳态功率输出值为0.049(标幺 值),和其他两种方案相差不大,风能利用系数也 接近,这是由于当风速较低时,超速减载方案预 留功率量较少,一次调频能力不足。综合分析, 低风速、负荷突增工况下,虚拟惯量控制策略转 子动能低,超速减载方案预留功率少,调频能力 差,而基于转子动能和分布式储能方案由于具有 超级电容器协助,调频效果最好。

3.2.2 负荷突减

中风速(10 m/s)时,仿真设置系统负荷在5 s 时突减100 MW,对比三种不同控制策略下系统 频率、风机出力和转子转速的变化情况,如图6所 示。从图6可以看出,中风速下三种策略的频率 上升速率相同,频率最高点均为50.29 Hz;稳态频 率最低的是基于转子动能和分布式储能策略的 50.19 Hz,其次为超速减载策略的50.2 Hz,虚拟惯 量策略由于不具备一次调频能力,其稳态频率最 高,为50.22 Hz。图6显示,即使在中风速下,频 率波动前超速减载策略的转子转速已经达到 1.18 (标幺值),接近上限值,当参与调频后转速

电气传动 2023年 第53卷 第11期

更是上升到1.21(标幺值)。仿真结果表明,超速 减载策略在负荷突减工况下转速的变化限制了 其频率调节能力。



高风速(12 m/s)时,设置同样的仿真工况,仿 真结果如图7所示。从波形结果可以看出,无论 从最大频率偏差量还是稳态频率偏差量看,基于 转子动能和分布式储能方案的调频效果最好。 超速减载策略的稳态频率和虚拟惯量策略几乎 相等,均为52.1 Hz,表明高风速下超速减载方案 不再具备一次调频能力,这是由于频率变化前风 机转子转速已经达到上限值,无法再通过提速的 方式减少风电机组的有功输出,为系统提供一次 频率调节。高风速下,超速减载策略的风电机组 输出功率、风能利用系数与其他两种策略相差最 大,几乎达到2倍,此时风能资源浪费现象最严 重,调频效果也较差。



综合对比不同风速和不同负荷波动下的仿 真结果可以得出:低风速时,虚拟惯量策略的转 子转速接近下限值,在响应系统频率偏差量时转 子动能不足,超速减载策略的风电机组输出功率 低,预留功率较少,两者调频能力均较差;高风速 时,超速减载控制策略的转子转速接近上限,转 子调节范围减小,一次调频能力不足。而基于转 子动能和分布式储能风机调频策略在以上四种 工况下惯量和一次频率调节效果均最优,能有效 满足电网对风电机组调频能力的要求。

4 实验验证

为了验证所提控制策略的可行性,搭建了如 图 8 所示的风电机组实验平台,该平台由异步电 动机、双馈感应发电机、变流器柜、变频器柜、超 级电容器柜、电网模拟器和 RCP上位机组成,双 馈感应发电机在异步电动机拖动下旋转发电,经 变流器柜、母线与电网模拟器连接,超级电容器 框则通过 DC/DC 变换器与直流母线相连进行能 量交换,平台各部分参数如表4所示。基于转子 动能与分布式储能的风机调频策略主要是通过 控制转子侧变流器和 DC/DC 变流器实现,故在实 验过程中按2.1节方式通过 RCP上位机对变流器 框和超级电容器柜实时控制,实现文中所提控制 策略。



| | 设备类型 | 相关参数 | 设备类型 | 相关参数 |
|---|---------|--------------|--------|-------------|
| | 异步电动机 | 7.5 kW,380 V | 超级电容器柜 | 3.5 F |
| 5 | 双馈感应发电机 | 5 kW,380 V | 变流器柜 | 5 kW,380 V |
| | 变频器柜 | 5 kW,380 V | 电网模拟器 | 30 kW,380 V |

双馈风电机组与电网直连,文中利用电网模 拟器分别对电网频率下降(负荷增加)和频率上 升(负荷减少)工况进行模拟,验证所提控制策略 的实验结果。设置输入电网模拟器的频率曲线 初始时为50 Hz,10 s后下跌至49.9 Hz,40 s时恢 复至50 Hz,30 s后频率又上升至50.1 Hz,该工况 下双馈风电机组有功功率、转子转速和超级电容 器的有功输出结果如图9所示。



实验结果表明,当系统频率突然下跌时,在 惯量控制作用下转子转速由稳态时的1610 r/min 降至1585 r/min,风机输出功率由初始的4 kW 瞬 间增大至4.3 kW,随着后期系统频率的稳定,风 电机组在分布式储能的作用下持续额外提供 0.25 kW有功功率补偿。当系统频率上升时,频 率变化率为正值,转子转速增大至1650 r/min,超 级电容器以-0.25 kW 吸收有功功率进行充电,在 两者共同作用下,风机输出功率降至3.65 kW,之 后转子转速逐渐恢复到初始值1610 r/min,转子 动能退出风机调频,超级电容器持续吸收有功功 率直至频率恢复额定值。实验数据显示在基于 转子动能与分布式储能风机调频控制策略下,风 电机组输出功率由转子转速和超级电容器共同 决定,能够有效响应系统频率波动,为电网提供 动态有功功率支撑。

5 结论

考虑到虚拟惯量控制策略无法提供一次频 率调节,超速减载控制策略转速调节范围受限、 发电效益下降,提出了基于转子动能与分布式储 能风机调频控制策略,利用转子动能提供惯量功 率支撑、分布式储能装置响应一次频率调节,将 两者共同作为风机调频能量来源,既为风机并网 调频提供新方法,也简化风机升级改造难度。

1)对1.5 MW和2 MW风电机组在不同转速 下所含转子动能进行计算,分别确定其在10%额 定功率支撑下的频率调节时长,结果表明,无论 处于何转速值,风机转子动能均可提供不少于5s的惯量支撑,但不能满足一次调频30s时长的要求。因此当负荷增加导致系统频率下跌时,可将双馈风机转子动能作为响应频率变化率,即提供惯量支撑的能量来源。

2)结合分布式储能装置能量充足的特点,选 择超级电容器作为风机一次调频能量源,响应频 率偏差量,同时依据分布式储能装置的调频功能 及网侧变流器对功率的限制,优化其容量配置, 最大程度降低储能装置经济成本。

3)在综合考虑超级电容器和变流器的安装 成本下,超速减载的年经济损失为50.1万元,而 基于转子动能与分布式储能的年平均投资为 4.91万元,对比发现所提控制方案仍有较强的经 济优势。

4)相较于虚拟惯量和超速减载策略,基于转 子动能与分布式储能风机调频策略无论是在低、 中、高风速下,或是负荷突增、突减工况下,其频 率调节效果均为最优,有效提升了并网风机的惯 量和一次调频能力,实验结果也表明其能有效响 应系统频率波动。

参考文献

- [1] 国家能源局.国家能源局发布1—11月份全国电力工业统 计数据:中国[DB/OL].(2021-12-17)[2022-09-03]. http:// www.nea.gov.cn/2021-12/17/c_1310378945.htm.
 National Energy Administration. National Energy Administration releases statistics of national electric power industry from January to November: China[DB/OL]. (2021-12-17)[2022-09-03]. http://www.nea.gov.cn/2021-12/17/c_1310378945.htm.
- [2] 袁小明,程时杰,胡家兵.电力电子化电力系统多尺度电压 功角动态稳定问题[J].中国电机工程学报,2016,36(19): 5145-5154,5395.

YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (19):5145–5154,5395.

- [3] 刘巨,姚伟,文劲宇,等.大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J].电网技术,2014,38(3):638-646.
 LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38 (3): 638-646.
- [4] DREIDY M, MOKHLIS H, MEKHILEF S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 144–155.

- [5] 曹军,王虹富,邱家驹.变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(13):78-82. CAO Jun, WANG Hongfu, QIU Jiaju. Frequency control strategy of variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(13):78-82.
- [6] 关宏亮,迟永宁,王伟胜,等.双馈变速风电机组频率控制的 仿真研究[J].电力系统自动化,2007,31(7):61-65.
 GUAN Hongliang, CHI Yongning, WANG Weisheng, et al. Simulation on frequency control of doubly fed induction generator based wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(7):61-65.
- [7] 李和明,张祥宇,王毅,等.基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J].中国电机工程学报,2012,32
 (7):32-39,188.

LI Heming, ZHANG Xiangyu, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines based on the optimal power tracking [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 32–39, 188.

[8] 田新首,王伟胜,迟永宁,等.基于双馈风电机组有效储能的 变参数虚拟惯量控制[J].电力系统自动化,2015,39(5):20-26,33.

TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Variable parameter virtual inertia control based on effective energy storage of DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5):20–26, 33.

- [9] 李少林,王伟胜,张兴,等.风力发电对系统频率影响及虚拟 惯量综合控制[J].电力系统自动化,2019,43(15):64-70.
 LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined vitural inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43 (15):64-70.
- [10] 丁磊,尹善耀,王同晓,等.结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J].电网技术,2015,39(9):2385-2391.
 DING Lei,YIN Shanyao,WANG Tongxiao, et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2385-2391.
- [11] MARGARIS I D, PAPATHANASSIOU S A, HATZIARGYRI-OU N D, et al. Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(2):189-199.
- [12] 李颖颖,王德林,范林源,等.双馈风电机组限功率运行下频 率稳定的变系数控制策略[J].电网技术,2019,43(8):2910-2917.

LI Yingying, WANG Delin, FAN Linyuan, et al. Variable coefficient control strategy for frequency stability of DFIG under power-limited operation[J]. Power System Technology, 2019, 43 (8):2910–2917.

[13] 张坤,黎春湦,毛承雄,等.基于超级电容器-蓄电池复合储 能的直驱风力发电系统的功率控制策略[J].中国电机工程 学报,2012,32(25):99-108.