双馈感应风力发电机的电压/频率协调控制策略

程进,潘智轩,程海锋,戴明利,黄敏丽

(上海勘测设计研究院有限公司,上海 200335)

摘要:随着风电机组渗透率的不断提高,为抑制双馈感应风力发电机(DFIG)因自身有功输出波动导致并 网后电压/频率波动,提出了一种基于分布式储能的DFIG惯量支撑与一次调频控制。在此基础上,分析DFIG 机组的无功和电压调节能力,进而提出有功-频率和无功-电压的协调控制方案,所提策略兼顾风电机组的调 频备用与发电效益,经济性较强。最后通过仿真实验表明,基于分布式储能的双馈风电机组充分参与系统调 频,风机输出的有功功率能够及时响应有功负荷波动,提升一次频率调节能力,另外其输出的无功功率还可以 跟随电压的波动进行相应的调整,明显改善发电机端口电压波动情况,为DFIG控制策略的改进与优化提供了 新思路。

关键词:双馈风电机组;虚拟惯量;一次调频;电压/频率协调控制;分布式储能 中图分类号:TM933 文献标识码:B DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd24401

Voltage/Frequency Coordinated Control Strategy of Doubly-fed Induction Wind Turbine

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

Abstract: With the continuous improvement of the penetration rate of wind turbines, in order to suppress the voltage/frequency fluctuations of the doubly-fed induction generators (DFIGs) after grid-connected due to their own active power output fluctuations, a DFIG inertia support and primary frequency modulation control based on distributed energy storage was proposed. On this basis, the reactive power and voltage regulation capability of DFIG units was analyzed, and a coordinated control scheme of active power-frequency and reactive power-voltage was proposed. Finally, the simulation experiment shows that the DFIG based on distributed energy storage fully participates in the system frequency regulation, and the active power output by the wind turbine can respond to the active load fluctuation in time, improve the primary frequency regulation ability of the system. In addition, the output reactive power can also be adjusted according to the fluctuation of the voltage, which can significantly improve the voltage fluctuation of the generator port, and provide a new idea for the optimization and improvement of the DFIG control strategy.

Key words: doubly-fed wind turbine; virtual inertia; primary frequency; voltage/frequency coordinated control; distributed energy storage

双馈感应风力发电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)是目前的主流机型,然而由 于传统 DFIG 运行在最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)状态,转子转速与系 统频率解耦,失去了对频率波动的响应能力。

对此,文献[1-2]提出通过在机侧变流器控制 中附加转矩响应环节来提供惯性响应。文献[2] 提出在 MPPT 有功功率给定值上附加与频率变化 率(-df/dt)和频率偏差(-Δf)成正比的参考值,以 模拟惯量和支持一次调频^[3-5]。因此,当风力发电 系统模拟惯量控制时,机组惯性动能只能为系统 提供数s的支持^[6],并且当转子动能释放到阈值 后,不能继续参与调节,需要从电网吸收能量再 次存储,才能恢复其惯量支撑能力。如果此时电 网频率尚没有恢复到稳定状态,转子动能的再次 存储将会影响系统频率的恢复,导致频率二次震 荡,恶化系统频率和电压的调节。

文献[7]采用改进频率控制单元,提高响应速

基金项目:北京市自然科学基金(3212067)

作者简介:程进(1991一),男,硕士,高级工程师,Email:2451211179@qq.com

度,改善暂态频率偏差,加速机组转速恢复,文献 [8]提出推迟转速恢复阶段,将其控制在电网频率 恢复到最佳运行状态后开启,避免因转子动能存 储引起的频率二次震荡。

文献[9-12]通过调节桨距角预留旋转备用 容量来提供惯量支持系统调频,然而,桨距角响 应速度较慢,影响到正常工况下的风能利用率, 在实际工程应用中,也存在一定的维修风险,增 加维护成本。为了实时响应系统一次调频,文 献[13-14]提出在超速减载控制的基础上利用风 电机组有功/频率下垂控制特性,超速减载方式 节省了常规备用的投资成本,交流变频技术加 快了功率控制速度,增强频率稳定性,但这种方 式缩小了正常工况下转子有效运行范围,更降 低了风能利用率,影响风电机组发电效益。基 于以上研究背景, 文献[15-18]提出综合超速减 载与变桨距角控制,对DFIG整体控制性能特别 是一次调频特性有显著的优化效果,在此基础 上,文献[19]在控制过程中设计修正下垂系数,进 一步改善一次调频能力。上述研究虽比文献[9-12] 变桨控制预留备用容量方案的风能利用率有所 提高,也比文献[13-14]超速减载控制方案的转 速运行范围有所扩大,但风机在全工况下的风 能利用率仍然降低了,究竟降低了多少未见有 评述的文献。

文献[20]指出在高渗透率背景下,储能技术 凭借其快速响应能力在风电场频率响应方向上 具有广阔的应用前景;文献[21]提出了基于储能 技术的风电场虚拟惯量补偿策略;文献[22]论述 了风电场装配集中式储能参与一次调频的方 案;文献[23]论述了基于限转矩控制的风储联合 调频控制策略的有效性;文献[24]在直流母线处 配置超级电容器组储能单元完成故障穿越;文 献[25]和文献[26]分别采用直流母线并联配置锂 电池和超级电容器参与系统惯量支撑与一次调 频,并没有考虑到频率变化时的电压波动情况, 且目前尚无综合分析风电机组频率和电压协调 控制研究。

综上,本文综合考虑DFIG发电效益和系统一次调频需求,提出基于分布式储能控制 DFIG参与系统惯量支撑与一次调频控制。分析双馈感应机组的无功调节能力,从而确定其 有功-频率和无功-电压协调控制策略。基于 Matlab/Simulink 搭建四机两区域模型,对所提 方案具备电压和频率协调控制功能进行仿真 验证。最后通过实验说明了所提控制策略的 有效性。

1 基于分布式储能的DFIG电压/频 率协调控制方法

1.1 基于储能装置的DFIG惯量支撑与一次调频

双馈感应发电机组采用超速减载控制时,不 仅影响了其正常工作时的发电效益,还忽视了负 荷突减时转速和功率调节深度的问题。对此,本 文综合超速减载控制和 MPPT 的优势,提出控制 策略如图1 所示。





将扰动分为三类:1)无扰动时,风机工作在 MPPT状态下,输出功率 P_{o} 即为参考功率 P_{ref} ,无 其他附加功率;2)当负荷预测模块发现负荷增加 时,保持与无扰动时相同的控制,保证风电机组 的最大发电效益;3)发现负荷减小时,根据频率 偏差 Δf 和频率变化率df/dt得到附加调节功率 $\Delta P_1 和 \Delta P_2$,其中,一次调频功率 $\Delta P_1 = K_p \times \Delta f$,惯量 支撑功率 $\Delta P_2 = K_d \times df/dt$,最终得到参考功率 $P_{ref} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + P_o$,据此实现风电机组的调频控制。

由上述控制策略可知,负荷增加后 DFIG 由 于缺乏备用容量以至于不能参与系统一次调 频,解决问题的关键是配备合适的储能系统参 与系统调频。储能系统通过双向 DC/DC 变流器 连接到直流侧母线电容上,该变流器能够凭借 其ms级的响应速度支持储能系统完成输出功率 的快速变化,进而帮助风电机组完成一次调频 控制,同时能够在系统恢复稳定状态后及时退 出,有效地避免超调现象的出现。同时,超级电 容器功率密度大、可循环次数较多,因此,本文 选取超级电容储能系统为风电机组提供备用容 量,如图2所示。



Fig.2 DFIG energy storage configuration

利用下垂控制给定其输出功率参考值,如下 式所示:

$$P_{\rm ref_scss} = K_{\rm scss} \Delta f \tag{1}$$

式中:K_{scss}为下垂系数。

当负荷增加时,超级电容储能系统持续 放电。

1.2 DFIG 的无功电压控制方法

1.2.1 无功功率限值的计算

由于网侧变流器无功输出较少,本节为了简 化计算,将其忽略。DFIG等效电路图如图3所 示。图3中,P_s,Q_s,P_r,Q_r分别为定、转子侧输出 的有功和无功功率。



图 3 双馈风电机组的等效电路图 Fig.3 Equivalent circuit diagram of DFIG 根据图 3,可以得到如下的关系式:

$$\begin{cases} \boldsymbol{E} = j\boldsymbol{I}_{m}\boldsymbol{X}_{m} \\ \boldsymbol{U}_{s} = \boldsymbol{E} - \boldsymbol{I}_{s}(\boldsymbol{R}_{s} + j\boldsymbol{X}_{\sigma s}) \\ \frac{\boldsymbol{U}_{r}}{s} = \boldsymbol{E} + \boldsymbol{I}_{r}(\frac{\boldsymbol{R}_{r}}{s} + j\boldsymbol{X}_{\sigma r}) \\ \boldsymbol{I}_{m} = \boldsymbol{I}_{r} - \boldsymbol{I}_{s} \end{cases}$$
(2)

式中: $R_s, X_{\sigma s}, R_r, X_{\sigma r}$ 分别为定、转子电阻、电抗; X_m 为激磁电抗; I_s, I_r 分别为定、转子电流向量; I_m 为 励磁电流向量;s为转差率; U_s, U_r 分别为定、转子 电压向量;E为气隙磁场感应电动势向量。 令

$$\begin{cases} U_{s} = U_{s} \angle 0^{\circ} \\ I_{s} = I_{ps} + jI_{qs} \end{cases}$$
(3)

式中: I_{ps} 为定子侧电流的有功分量; I_{qs} 为定子侧 电流的无功分量; U_s 为定子电压。

对定子侧有功和无功采用解耦控制,则 20

$$\begin{cases} I_{\rm ps} = \frac{P_{\rm s}}{3U_{\rm s}} \\ I_{\rm qs} = \frac{-Q_{\rm s}}{3U_{\rm s}} \end{cases}$$
(4)

(6)

由此可得到 P_s, Q_s 与转子电流之间的关系,如下 所示:

$$I_{r} = \frac{1}{3X_{m}U_{s}} \left[(P_{s}X_{s} - Q_{s}R_{s}) - j(3U_{s} + P_{s}R_{s} + Q_{s}X_{s}) \right]$$
(5)

$$U_{\rm r} = \frac{\sqrt{(R_{\rm s}^2 + X_{\rm s}^2)(P_{\rm s}^2 + Q_{\rm s}^2) + 6U_{\rm s}^2(R_{\rm s}P_{\rm s} + Q_{\rm s}X_{\rm s}) + 9U_{\rm s}^4}}{3X_{\rm m}U_{\rm s}}$$

将式(6)做出进一步的整理,得到下式:

$$(P_{\rm s} + \frac{3U_{\rm s}^2 R_{\rm s}}{R_{\rm s}^2 + X_{\rm s}^2})^2 + (Q_{\rm s} + \frac{3U_{\rm s}^2 X_{\rm s}}{R_{\rm s}^2 + X_{\rm s}^2})^2 = \frac{9X_{\rm m}^2 U_{\rm s}^2 I_{\rm r}^2}{R_{\rm s}^2 + X_{\rm s}^2}$$
(7)

进一步忽略 R_s,则定子发出无功功率限值为

$$\begin{cases} Q_{\rm smax} = -\frac{3U_{\rm s}^2}{X_{\rm s}} + \sqrt{\left(\frac{3U_{\rm s}X_{\rm m}I_{\rm max}}{X_{\rm s}}\right)^2 - P_{\rm s}^2} \\ Q_{\rm smin} = -\frac{3U_{\rm s}^2}{X_{\rm s}} - \sqrt{\left(\frac{3U_{\rm s}X_{\rm m}I_{\rm max}}{X_{\rm s}}\right)^2 - P_{\rm s}^2} \end{cases}$$
(8)

式中: Q_{smax} , Q_{smin} 分别为定子侧输出无功功率的最大值和最小值; I_{max} 为转子电流最大值, 通常取1.2 (标幺值)。

观察式(8)可以得到,风机的有功功率输出 实际值决定了机组能够输出无功功率的最大范 围,从而构建无功限幅模块。

1.2.2 无功-电压下垂控制策略

为了达到平抑风电系统电压振荡的目的,本 文优化无功控制,改进风机转子侧变流器控制策 略,如图4所示。



Fig.4 Reactive power control strategy block diagram

图4中, K_q 为下垂系数, u_{ref} 为电压参考值,u为实际值。为获取无功功率给定值 Q_{ref} ,其控制步骤如下:首先, Q_0 为正常工作时,在单位功率因数状态下风机的无功功率输出值,故 $Q_0=0$ 。 ΔQ 为

电压振荡时通过下垂控制得到的无功功率输出 值, $\Delta Q = K_q(u_{ref}-u)$ 。令 $Q_c = \Delta Q + Q_0$,再根据式(8) 设计无功限幅模块, Q_c 经过限幅模块得到最终参 考值 Q_{ref} 。

1.3 总控制方案

综上所述,本文提出风机有功-频率和无功-电压协调控制策略,如图5所示。



Fig.5 Overall control scheme

本文所提控制策略皆在转子侧变流器中完成,主要控制思路如下:当 $|\Delta f| \le 0.03$ Hz,即无扰动时,风机工作在MPPT状态下,输出功率 P_{ω} 即为参考功率 P_{ref} ,无其他附加功率。当 $\Delta f < -0.03$ Hz,即负荷增加时,通过超级电容器放电参与系统调频的有功功率值。当 $\Delta f > 0.03$ Hz,即负荷减小时,根据 Δf 和df/dt得到附加调节功率 ΔP_1 和 ΔP_2 ,其中: $\Delta P_1 = K_p \times \Delta f$, $\Delta P_2 = K_d \times df/dt$,最终得到参考功率 $P_{ref} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + P_{\omega}$ 。

同时,为了避免源荷波动对电压的影响,根据图4,得到转子侧变流器控制无功输出给定值 Q_{ref},抑制系统电压波动,支持电压恢复。为了避免无功输出影响系统有功控制,参考式(8)定义 无功功率输出极限范围,得到Q_{smax}和Q_{smin},设计 无功限幅模块,避免无功控制影响频率调节能力。

2 基于超级电容储能调频控制经济 性评估

在保持10%预留备用功率的前提下,1.5 MW

双馈机组效益分析如表1所示^[22]。可以看出,不 管是在不限电区域还是限电50%的区域,其年损 失电量和年经济损失都不容忽视。

表1 风机运行经济性分析

Tab.1 Economic analysis of wind turbine operation

是否 限电	年损失电量/ (万 kW・h)	损失电量占年 放电量比例/%	电价/ 元	年经济损 失/万元
不限电	69.6	18.57	0.54	37.8
限电 50%	44.1	11.76	0.54	23.8

根据文献[26]计算得到采用144V×55F超级 电容模组6串3并共18组参与系统一次调频。其 成本*S*(F)如下所示:

$$S_{(E)} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \tag{9}$$

式中:*C*₁为超级电容器建设成本;*C*₂为系统运行 成本;*C*₃为设备日常维护所需要的成本;*C*₄为储 能系统购电成本。

超级电容器建设成本C1如下所示:

 $C_1 = (\alpha_p \times P_{rated}) + (\alpha_E \times E_{rated}) + C_{build}$ (10) 式中: α_p 为单位功率价格,单位元/kW; P_{rated} 为额 定功率,单位 kW; α_E 为单位容量价格,单位元/ (kW·h); E_{rated} 为额定容量,单位 kW·h; C_{build} 为建 设过程中的其他成本。

系统运行成本 C₂如下所示:

$$C_2 = \sum_{i=1}^{N} E_{i(\text{loss})} \times \alpha_{i(\text{cha - energy})}$$
(11)

式中:N为额定循环次数;i为第i次充放电; $\alpha_{i(cha-energy)}, E_{i(loss)}$ 分别为第i次充放时的购电单价和 能量损失。

设备日常维护所需要的成本 C₃如下所示:

$$C_{3} = \alpha_{\text{(o\&M)}} \times P_{\text{rated}}$$
(12)

式中:α_{(o&M})为单位功率的超级电容器日常维护所 需费用,单位元/kW。

储能系统购电成本 C_4 如下所示:

$$C_4 = \alpha_{\rm E2} \times E_{\rm buy} \tag{13}$$

式中: α_{E2} 为售电电价,单位元/(kW·h); E_{buy} 为储 能系统购电电量,单位 kW·h。

有关超级电容器储能装置的技术经济指标 如表2所示。

表2 技术经济指标

Tab.2	Technical	and	economic	indicators
-------	-----------	-----	----------	------------

能量 密度/ (W・h・ kg ⁻¹)	能量 密度/ (W・h・ L ⁻¹)	功率 密度/ (W·kg ⁻¹)	功率 密度/ (W·L ⁻¹)	单位功率 成本/(元・ kW ⁻¹)	单位能量 成本/ (元・kW ⁻¹)
2.5~1.5	60~150	500~ 5 000	$> 10^{6}$	700~2 000	2 000~12 000
循环	次数	持续充放	如时间	响应时间	运行年限/y
> 20	0000	ms~60) min	ms级	15~20

目前DFIG低压侧多呈现出更明显的频率振 荡现象,以某电网内某35kV的母线为例,常规工 作状态下此区域系统频率在24h内的波动不超 过±0.04 Hz,但越过±0.033 Hz(火电机组调频死 区)高达1670次,调频电源频繁投入^[17]。为进一 步验证本文所提策略的效益问题,设定超级电容 器参与电网一次调频时,在电网频率越上限时充 电,越下限时放电,每次调频容量为150kW×30s。 同时结合式(8)~式(12)以及表1和表2所示的数 据,得到一台容量1.5 MW的DFIG配置150kW× 30s超级电容器的一次性投资额为64.7 万元。通 过折旧率考虑硬件损耗,平均每年仅需要投入 4.6 万元的建设投资金额,与备用方案相比其发 电效益更强。其技术经济性对比见表3所示。

表3 技术经济性对比

Tab.3 Technical and economic comparison

应用模式	技术性	经济性
预留10%(标幺值) 备用容量	与火电机组相当	年经济损失约30.8 万元
配置10%(标幺值) 储能装置	优于火电机组	年均投资约 4.6万元

在表3中,本文分别从技术性和经济性对比 两种应用模式,可知采用预留备用容量的应用模 式时,其技术性与火电机组相当,但高达30.8万 元的年损失不容忽视;对比发现,应用模式采用 10%(标幺值)储能装置时,不仅其性能明显优于 火电,且年均投资仅需约4.6万元。

3 仿真验证

3.1 仿真模型

本文在 Matlab 仿真软件构件搭建四机两区 域模型如图 6 所示,其中采用本文所提的超级电 容储能系统参与调频控制。



图 6 中, $G_1 \sim G_3$ 为容量 900 MW 的火电厂;风 电场 G_4 含 300 台容量为 1.5 MW 的 DFIG。Load₁ 和 Load₂分别为 880 MW 和 950 MW 的有功负荷, Load₃ 为随机波动负荷, C_1 和 C_2 为无功补偿装 置,具体仿真系统参数如下。原动机参数:桨距 角 β =0°,最佳叶尖速比 λ =8.1,最大风能利用系 数 C_p =0.48,额定风速V=12 m/s;发电机参数:定 子电阻 R_s =0.007 06(标幺值),定子电感 L_s =0.171 (标幺值),转子电阻 R_r =0.005(标幺值),转子电 感 L_r =0.156(标幺值),激磁电感 L_m =2.9(标幺值), 极对数p=3,惯性时间常数H=5.04 s,阻尼F=0, 直流电容C=10 F,直流母线电压 V_{de} =1 200 V; 网侧变流器控制参数:电压控制 K_p =0.002, K_i = 0.05;电流控制 K_p =1, K_i =100。转子侧变流器控制 参数:功率控制 K_p =1, K_i =5;电流控制 K_p =0.3, K_i =8。

3.2 负荷功率阶跃场景

3.2.1 有功负荷阶跃分析

给定机组额定风速10 m/s,并于仿真时间 第20 s增加100 MW负荷。仿真结果如图7~图 9所示。



观察图7最大功率跟踪控制曲线可以发现, 在MPPT控制下,风电机组缺乏对频率的调节作 用,系统负荷增加100 MW后,频率跌落程度最 深;采用本文所提有功-频率调节策略后,相比于 原来的MPPT控制,频率跌落程度明显减小。由 图8可知,负荷增加100 MW同样会带来系统电 压的波动,在MPPT控制下,风机机端电压跌落深 度深;采用本文所提的电压/频率协调控制能够有 效地降低电压跌落深度,效果显著。

由图9可知,在MPPT模式下,风电机组输出 功率皆不响应负荷的变化,始终保持恒定状态, 并不参与满足系统的调频和调压需求,本文所提 策略对此进行了合理的改进。改进频率控制后, 风电机组输出有功功率响应系统内负荷的增加, 进一步增加无功-电压调节控制,对于风机出口 电压的波动也能输出无功功率来响应。故本文 所提策略能够应对系统负荷突增的情况,平抑此 时电压和频率的波动。

3.2.2 无功负荷阶跃分析

给定风速10 m/s,并于仿真时间第20 s增加 100 Mvar 无功负荷。仿真结果如图10~图12 所示。





图 12 风电机组输出功率曲线(无功负荷阶跃)

 $Fig. 12 \quad Wind \ turbine \ output \ power \ curves (reactive \ load \ step)$

从图 11 中可以发现,当风电机组采用 MPPT 控制模式时,风机缺乏对电压的响应能力,于仿 真时间第 20 s 增加 100 Mvar 系统无功负荷后,电 压跌落程度最深。结合图 10,无功负荷的增加也 带来了不小的频率波动。采用本文所提策略后, 电压跌落情况得到了明显的改善,并且有效地抑 制了频率波动现象。

进一步观察图12可以看出,采用MPPT控制时,面对系统负荷增加100 Mvar的情况,风电机 组功率输出几乎不响应,系统抗扰能力较弱。采 用本文所提的电压/频率协调控制后,机组输出功 率支持频率和电压的恢复,系统稳定性增强。

3.3 源荷随机波动场景

给定随机波动风速,并伴随有功、无功随机 波动的负荷,有功负荷在±200 MW波动,无功负 荷在±160 Mvar波动,如图13所示。



最大功率跟踪控制策略及本文所提电压/频 率协调控制策略2种控制策略下的频率偏差仿真 结果如图14所示。





观察图 14 和图 15 可以发现,采用 MPPT 控 制时,面对负荷和风速的随机波动,系统频率和 电压的振荡幅度较大。采用本文所提策略后, 频率偏差减小,相比于 MPPT 控制,负荷增加时, 系统频率跌落深度降低,负荷减小时,频率超调 现象不明显。同时,系统电压稳定性得到显著 改善,面对风速和负荷的变化,电压基本能保持 恒定状态。

图 16为2种控制策略下风电机组输出功率仿 真结果曲线图。



Fig.16 Output power curves of the wind turbine (random fluctuation of source load)

观察图16可以发现,在源荷波动情况下,采 用 MPPT 控制时,风速的波动影响风电机组有功 输出,风速增加,风机输出功率也增加,如果此时 系统负荷减小,将会使系统频率超调明显,缺乏 调频能力,同时其电压调节能力也较弱。

采用本文提出的电压/频率协调控制后,风 电机组能够跟随有功负荷的变化输出有功功 率,提供调频能力,稳定系统频率,也能响应无 功负荷,输出无功功率。

4 实验验证

为验证本文所提控制策略的有效性,本文采用10kWDFIG实验装置进行验证,图17为该实验装置图。该实验装置由变频调速柜、转子侧和网侧变流器、电网模拟器、快速原型控制器、超级

电容器组成,转子侧变流器由快速原型控制器 (rapid control prototype, RCP)控制,网侧变流器 由TMS320F28335 DSP芯片实现基于直流母线电 压外环的传统控制,超级电容器由4组110 V×7 F 超级电容模组两串两并实现。



图 17 10 kW 双馈风力发电机组实验装置图

Fig.17 Experimental setup of 10 kW doubly-fed wind turbine

DFIG实验系统电气参数为:额定功率 $P_n=10$ kW, 额定电压 $U_n=380$ V,转速范围 $\omega_r=1$ 200~1 800 r/ min,额定频率 $f_n=50$ Hz,直流母线电压 $V_{de}=600$ V, 定转子匝数比为1,定子漏抗 $L_{ls}=1.71$ mH,转子漏 抗 $L_{tr}=2.39$ mH,激磁电抗 $L_{m}=89.5$ mH,定子电阻 $R_s=0.467$ Ω,转子电阻 $R_r=0.233$ Ω,串联激磁电阻 $R_m=0.6334$ Ω。

4.1 一次频率调节的验证

为验证一次调频控制的有效性,本文采用电 网模拟器设置电网频率波动,分别将频率值由50 Hz上下波动±0.1~±0.3 Hz,如图18a所示。设置 双馈风电机组的风速为8 m/s,风电机组根据电网 模拟器频率波动输出的有功功率见图18b所示, 当系统频率降低时,风电机组输出有功功率,反 之,风电机组吸收有功功率。超级电容器的输出 功率曲线如图18c所示,当频率降低时,超级电容 器放电,参与系统一次调频。当系统频率增加 时,风电机组通过增加转子转速降低输出的有功 功率,参与系统一次调频,如图18d所示。在整个 过程中,风电机组的直流母线电压维持在300 V, 如图18e所示,为超级电容器通过网侧变流器进 行充/放电提供了良好的基础。



4.2 一次电压调节的验证

为验证双馈风力发电机组定子侧无功电压下 垂控制方案的有效性,在时间T为10s时,采用电网 模拟器设置持续时间为10s的电压波动,电压降低 分别跌落至额定电压0.75(标幺值)和0.5(标幺 值),升高至额定电压1.25(标幺值)和1.5(标幺值)。

图 19 为验证双馈风电机组定子侧的无功电 压下垂控制的实验波形图,从图中可以得到,其 风电机组定子侧根据电网电压波动快速输出无 功功率,该技术为电网提供了电压支撑。



5 结论

本文提出计及分布式储能的DFIG电压/频率 协调控制,实现电压、频率的双向调节功能,为风 电机组的本体改造与控制升级提供了思路。

1) 在风机 MPPT 控制基础上提出基于超级电 容器的调频策略,在保障经济性的同时,显著提 升了风机的调频能力。

2)提出基于分布式储能的双馈感应风力发 电机电压/频率协调控制的配置方案,与超速减载 预留备用方式相比,本文所提策略每年能够减少 85%的经济损失,同时又具有更好的控制性能, 且投资较少,仅为一台DFIG成本的10.8%。

3)本文所提策略兼顾风电机组有功和无功 的控制优化,能够同时增强系统频率和电压的稳 定性,优化系统一次调频过程,稳定机端电压。

参考文献

- Ekanayake J, Jenkins N. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 800–802.
- [2] Lalor G, Mullane A, O'Malley M. Frequency control and wind turbine technologies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1905-1913.
- [3] 颜湘武,宋子君,崔森,等.基于变功率点跟踪和超级电容器 储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术 学报,2020,35(3):530-541.

Yan Xiangwu, Song Zijun, Cui Sen, et al. Primary frequency

regulation strategy for doubly-fed wind turbines based on variable power point tracking and coordinated control of supercapacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3):530–541.

- [4] 夏祥武,田梦瑶.风电并网一次调频控制性能研究[J].电气 传动,2021,51(5):70-75.
 Xia Xiangwu, Tian Mengyao. Research on primary frequency modulation control performance of wind power grid-connected [J]. Electric Drive,2021,51(5):70-75.
- [5] 张冠锋,杨俊友,孙峰,等.基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术学报,2017,32 (22):225-232.

Zhang Guanfeng, Yang Junyou, Sun Feng, *et al.* Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 225–232.

[6] 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,2011,39(5):20-26,33.

Tian Xinshou, Wang Weisheng, Chi Yongning, *et al.* Variableparameter virtual inertia control based on effective energy storage for doubly-fed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 39(5): 20-26, 33.

- [7] 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 for variable speed constant frequency doubly-fed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13):78-
- [8] 刘彬彬,杨健维,廖凯,等.基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J].电力系统自动化,2016,40 (16):17-22.

Liu Binbin, Yang Jianwei, Liao Kai, *et al.* Improvement scheme of frequency control of doubly-fed wind turbine based on rotor kinetic energy control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 17–22.

[9] 周志超,王成山,郭力,等.变速变桨距风电机组的全风速
 限功率优化控制[J].中国电机工程学报,2015,35(8):
 1837-1844.

Zhou Zhichao, Wang Chengshan, Guo Li, *et al.* Out-put power curtailment control of variable-speed variable-pitch wind turbine generator at all wind speed regions[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1837–1844.

[10] 赵冬梅,许瑞庆,郑立鑫.全风况下双馈风机参与调频的协 调控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(12): 53-59.

Zhao Dongmei, Xu Ruiqing, Zheng Lixin. Research on coordinated control strategy for DFIGs participating in system frequency regulation with different wind[J]. Power System Protection and Control 2017, 45(12): 53–59.

[11] 付媛,王毅,张祥宇,等.变速风电机组的惯性与一次调频特 性分析及综合控制[J].中国电机工程学报,2014,34(27): 4706-4716.

Fu Yuan, Wang Yi, Zhang Xiangyu, *et al.* Inertia and primary frequency modulation characteristics analysis and comprehensive control of variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27):4706–4716.

[12] 赵晶晶,吕雪,符杨,等.基于双馈感应风力发电机虚拟惯量 和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J].中国 电机工程学报,2015,35(15):3815-3822.

Zhao Jingjing, Lü Xue, Fu Yang, *et al.* Dynamic frequency control of wind-solar-diesel microgrid based on joint control of virtual inertia and pitch angle of doubly-fed induction wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (15) : 3815–3822.

[13] 张留生,谢震,许可宝,等.基于超速和变桨优化协调的双馈 风电机组一次调频控制[J].电器与能效管理技术,2021 (10):18-27.

Zhang Liusheng, Xie Zhen, Xu Kebao, *et al.* Primary frequency modulation control of doubly-fed wind turbines based on optimal coordination of overspeed and pitch[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(10):18–27.

[14] 颜湘武,崔森,常文斐.考虑储能自适应调节的双馈感应发 电机一次调频控制策略[J].电工技术学报,2021,36(5): 1027-1039.

Yan Xiangwu, Cui Sen, Chang Wenfei. Primary frequency modulation control strategy of doubly-fed induction generator considering energy storage adaptive regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021,36(5):1027–1039.

- [15] 张昭遂,孙元章,李国杰,等.超速与变桨协调的双馈风电机 组频率控制[J].电力系统自动化,2011,35(17):20-25.
 Zhang Zhaosui, Sun Yuanzhang, Li Guojie, *et al.* Frequency control of doubly-fed wind turbines coordinated by overspeed and pitch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35 (17):20-25.
- [16] 潘文霞,全锐,王飞.基于双馈风电机组的变下垂系数控制 策略[J].电力系统自动化,2015,39(11):126-131.
 Pan Wenxia, Quan Rui, Wang Fei. Variable droop coefficient control strategy based on doubly-fed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 126-131.
- [17] 赵晶晶,吕雪,符杨,等.基于可变系数的双馈风机虚拟惯量 与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J].电工技 术学报,2015,30(5):59-68.

Zhao Jingjing, Lü Xue, Fu Yang, *et al.* Frequency regulation technology of wind-solar-diesel microgrid based on the coordination of virtual inertia and overspeed control of doubly-fed fan based on variable coefficient[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2015, 30(5):59–68.

[18] 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.

Li Heming, Zhang Xiangyu, Wang Yi, *et al.* Virtual inertial control technology for doubly-fed wind turbines based on power tracking optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32

82.

(7):32-39.

 [19] 全锐,潘文霞,刘明洋.基于低阶频率响应模型的双馈风电机组下垂系数修正方法[J].电力系统自动化,2018,42(1): 68-73,90.

Quan Rui, Pan Wenxia, Liu Mingyang. Correction method for droop coefficient of doubly-fed wind turbine based on low-order frequency response model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 68–73, 90.

- [20] 姚伟,文劲宇,黄莹,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.
 Yao Wei, Wen Jinyu, Huang Ying, *et al.* Technical prospect of large-scale wind power participating in system frequency adjustment[J]. Power System Technology, 2014,38(3):638-646.
- [21] 刘巨,姚伟,文劲宇,等.一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J].中国电机工程学报,2015,35(7):1596-1605.

Liu Ju, Yao Wei, Wen Jinyu, *et al.* A virtual inertia compensation strategy for wind farms based on energy storage technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015,35(7): 1596–1605.

[22] 刘辉, 葛俊, 巩宇, 等. 风电场参与电网一次调频最优方案 选择与风储协调控制策略研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 44-52.

Liu Hui, Ge Jun, Gong Yu, *et al.* Research on optimal scheme selection and wind-storage coordination control strategy for wind farms participating in power grid primary frequency regulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2 (1): 44–52.

- [23] 赵晶晶,李敏,何欣芹,等.基于限转矩控制的风储联合调频控制策略[J].电工技术学报,2019,34(23):4982-4990.
 Zhao Jingjing, Li Min, He Xinqin, *et al.* Wind-storage combined frequency regulation control strategy based on limited torque control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,34(23):4982-4990.
- [24] 孙谊媊,南东亮,张公生.含超级电容储能的直驱永磁风电机组高电压穿越控制策略[J].电气传动,2018,48(10):48-52,84.

Sun Yiqian, Nan Dongliang, Zhang Gongsheng. High voltage ride-through control strategy for direct-drive permanent magnet wind turbines with supercapacitor energy storage[J]. Electric Drive, 2018,48(10):48–52,84.

- [25] Kim Jinho, Muljadi Eduard, Gevorgian Vahan, et al. Dynamic capabilities of an energy storage-embedded DFIG system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55 (4): 4124-4134.
- [26] 颜湘武,崔森,宋子君,等.基于超级电容储能控制的双馈风 电机组惯量与一次调频策略[J].电力系统自动化,2020,44 (14):111-129.

Yan Xiangwu, Cui Sen, Song Zijun, *et al.* Inertia and primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on supercapacitor energy storage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14):111–129.

收稿日期:2022-05-28 修改稿日期:2022-07-12

(上接第17页)

中国电机工程学报,2020,40(15):4758-4770.

Guo Jian, Chen Yandong, Wang Xiangyu, *et al.* Broadband dq impedance modeling of load virtual synchronous machine and comparative analysis of stability between weak current network and traditional PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40 (15):4758-4770.

[12] 陈艳宁,王军,顾秀芳.双馈风电机组次同步谐振分析与抑制策略[J].电气传动,2019,49(8):86-92.

Chen Yanning, Wang Jun, Gu Xiufang. Analysis and suppression strategies on sub-synchronous resonance of DFIG[J]. Electric Drive, 2019,49(8):86–92.

- [13] 王杨,张兴,郭梓暄,等.虚拟同步发电机次同步振荡抑制策 略[J].电力电子技术,2021,55(4):20-25.
 Wang Yang, Zhang Xing, Guo Zixuan, *et al*.Suppression strategy of subsynchronous oscillation of virtual synchronous generator[J]. Power Electronics, 2021, 55(4):20-25.
- [14] 钱纹,赵岳恒,胡凯,等.双馈风电场并网次同步振荡分析与 抑制方法研究[J].电气自动化,2021,43(1):41-44.
 Qian Wen, Zhao Yueheng, Hu Kai, *et al.* Analysis of grid connection sub-synchronous oscillation and research of suppression method in doubly-fed wind farms[J].Electrical Automation, 2021,43(1):41-44.
- [15] 张学广,邱望明,方冉,等.双馈风电机组静止坐标系下阻抗 建模及次同步谐振抑制策略[J].电力系统自动化,2019,43
 (6):41-48,106.

Zhang Xueguang, Qiu Wangming, Fang Ran, *et al.* Impedance modeling and subsynchronous resonance mitigation strategy of DFIGbased wind turbine in static reference frame[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6):41–48, 106.

> 收稿日期:2022-06-29 修改稿日期:2022-08-01