

基于超级电容器的改进双馈风机调频策略

李志军¹, 刘士杰², 邱春阳², 王雅欣³

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130; 2. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300130; 3. 河北工业大学人工智能与数据科学学院, 天津 300130)

摘要: 双馈型风力发电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)可通过超速减载获得有功功率备用参与调频, 但由于DFIG有最低转速限制, 在转速恢复时可能导致严重的频率二次跌落。针对这一问题提出了一种基于双向DC/DC变流器和超级电容器储能参与调频的策略。首先基于DFIG传统超速减载调频原理, 分析了其可能产生频率二次跌落的原因和后果。然后, 结合超级电容器和DFIG网侧变流器的运行特性, 将超级电容器通过DC/DC变流器接口并联在DFIG背靠背变流器直流母线上, 利用DFIG网侧变流器协同超级电容器的储能特性来参与调频, 有效避免了频率的二次跌落, 达到良好的调频效果。最后, 通过仿真验证了所提方法的有效性与优越性。

关键词: 双馈风机; 超级电容器; 调频; 频率二次跌落; Buck-Boost变流器

Improved Frequency Modulation Strategy of DFIG Based on Supercapacitor

LI Zhijun¹, LIU Shijie², QIU Chunyang², WANG Yaxin³

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. College of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. College of Artificial Intelligence and Data Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The doubly-fed induction generator(DFIG) unit can obtain active power reserve by overspeed load shedding to participate in frequency modulation, but due to the minimum speed limit of DFIG, it may cause serious secondary frequency drop when speed is recovered. To solve this problem, a frequency modulation strategy is proposed based on bidirectional DC/DC converter and supercapacitor energy storage. Firstly, based on the traditional overspeed load shedding and frequency modulation principle of DFIG, the causes and consequences of secondary frequency drop are analyzed. Then, combined with the operation characteristics of the supercapacitor and the DFIG grid-side converter, the supercapacitor is connected in parallel to the DC bus of the DFIG back-to-back converter through the DC/DC converter interface, and the DFIG grid-side converter collaborates with the energy storage characteristics of the supercapacitor to participate in frequency modulation, effectively avoiding the secondary frequency drop and achieving good frequency modulation effect. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed method are verified by simulation.

Key words: double-fed induction generator; supercapacitor; frequency modulation; secondary frequency drop; Buck-Boost converter

0 引言

随着“十四五”双碳战略目标的提出, 风力发电成为我国重要的新能源发电方式, 风电的装机容量逐年攀升^[1]。在各类型风电机组中, 双馈型风力发

电机(doubly-fed induction generator, DFIG)因制造成本低、风能利用效率高被大规模安装, 以替代传统同步发电机承担发电任务^[2]。早期DFIG基于经济目标大多工作在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式下, 不具传统同步发电机惯性和调频响应^[3-4], 随着其接入比例的增加, 系统整体惯量水平和调频容量不足, 频率稳定问题日益凸显^[5-6]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U20A201284)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(U20A201284).

为解决大规模风电并网给系统带来的频率稳定性问题, 国内外陆续出台了风电场并网准则, 要求风电场具备参与调频能力。我国于 2011 年发布的 GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》也明确要求风电场具备参与调频、调峰能力^[7]。为了使 DFIG 具有调频能力, 文献[8-9]提出以超速减载的方式运行, 提高转子运行过程中的动能储备; 在频率扰动时, 通过附加控制手段利用转子动能参与调频。此技术方案能够使 DFIG 具有一定的调频能力, 但由于 DFIG 最低转速的限制^[10]和风速的不确定性, 使用该技术方案参与调频时, 很有可能在转速恢复过程中导致频率二次跌落 (secondary frequency dip, SFD)^[11-12]。频率二次跌落可能会使系统频率低于低频减载动作阈值, 严重时还可能使系统失稳, 造成更严重的后果^[13-14]。

为避免 DFIG 参与调频过程中频率二次跌落, 文献[15]提出限制参与调频功率, 通过延缓转速的下降幅度来减少频率二次跌落问题, 但该方法显然会降低系统的调频能力。文献[16]提出根据实时转速变化情况来输出调频功率, 避免转速恢复过程中的极端情况; 但该方法需要对转速变化实时预测, 实际运行场景下风速变化具有随机性, 转速的预测和控制难以实现。文献[17]指出, DFIG 本体调频能力较弱, 仅靠超速减载储备的能量难以满足调频所需, 为此提出利用电池储能来配合 DFIG 参与系统调频的技术方案, 以提高 DFIG 的调频能力。文献[18]则提出利用电池储能完全代替 DFIG 超速减载参与调频, DFIG 仍以最大功率点跟踪模式运行, 避免在调频过程中发生频率的二次跌落。上述两种调频技术方案依赖于储能电池的助力, 在调频过程中理论上都可以避免系统频率的二次跌落, 但对电池储能的功率和寿命有着较高的要求。

随着新能源占比的提升, “双高”特征的新型电力系统日渐生成, 系统频率也将呈现随机、频繁变化的特征, 传统电化学储能电池的功率密度和循环寿命均较低, 难以满足新型电力系统调频的需求^[19]。文献[20-21]分析对比了目前常用储能设备, 指出超级电容器的功率密度、响应速度、安全性和运维费用都要优于电池类设备, 循环寿命更是电池类设备的数十倍。从全生命周期来看, 超级电容器比电池类设备更适合被用于需要频繁大功率充放电的调频场景。文献[22-23]充分利用 DFIG 的背

靠功率变流器容量裕度, 将超级电容器直接并联在 DFIG 直流母线上, 通过网侧变流器改变母线电压来控制超级电容器释放和吸收有功功率, 达到调频并避免频率二次跌落的目的; 但由于 DFIG 正常运行情况下直流母线电压可变化范围有限, 使得该技术方案需要并入较大容量的超级电容, 成本较高且会造成超级电容器容量的浪费。

综上所述, 针对 DFIG 在参与调频过程中的频率二次跌落的问题, 本文结合双向 DC/DC (buck-boost) 变流器运行特性, 提出了一种将超级电容器 (super-capacitor, SC) 经 DC/DC 变流器并联在 DFIG 背靠背变流器直流母线参与调频的策略。该策略利用 Buck-Boost 变流器来泵升超级电容器电压以提供直流母线的调频能量, 实现储存容量的充分利用, 降低容量配置; 利用 DFIG 原有背靠背变流器的冗余设计容量, 通过控制 Buck-Boost 变流器的变送功率大小协同 DFIG 网侧变流器实现调频功能。该策略可以充分利用超级电容高功率密度、高循环寿命的特点, 具有良好的动态调频特性, 可有效提升 DFIG 全风速段的调频能力, 避免 DFIG 参与调频时频率二次跌落。

1 超速减载调频原理及频率二次跌落问题

DFIG 为获取最大发电效益, 以最大风能捕获模式运行时, 风力机捕获的机械功率 P_m 和输出功率 P_{MPPT} 分别为:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$P_{MPPT} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \left(\frac{\omega_r R}{\lambda_{opt}} \right)^3 C_{p, max} = k \omega_r^3 \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; A 为风电机组叶片迎风扫掠的面积; v_w 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数; λ 为叶尖速比; β 为风电机组桨距角; R 为风电机组叶轮半径; P_{MPPT} 为最大功率追踪输出功率; ω_r 为转动角速度; λ_{opt} 为风电机组捕获最大风能时的最优叶尖速比; $C_{p, max}$ 为风电机组捕获最大风能的风能利用系数; k 为风电机组特征参数。

传统电力系统具有良好的频率稳定性得益于系统中存在着大量具有旋转动能和能量储备的同步发电机, 在频率受到扰动时, 同步发电机能够释放转子动能和储备能量为系统提供惯量支撑和一次调频的功能。DFIG 和同步发电机一样具有旋转机械结

构,原则上在频率扰动时也可以通过释放风轮和转子中蕴含的动能来提高输出功率参与调频。

DFIG 需要参与调频的情况下,通常采用超速减载的方式运行^[8-11],使其能够储存更多的动能作为参与调频的有功备用。超速减载参与调频的运行曲线如图 1 所示。

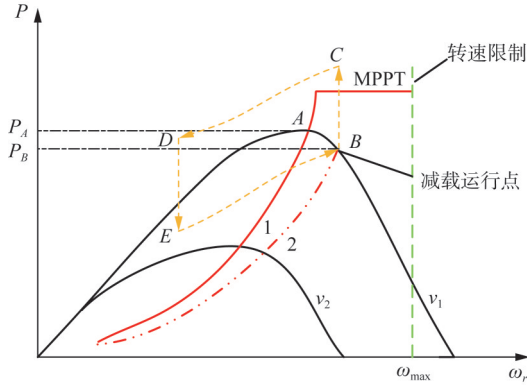


图 1 DFIG 超速减载参与调频运行曲线

Fig. 1 DFIG overspeed load shedding participates in frequency modulation operation curves

图 1 中曲线 v_1 、 v_2 分别为风速 v_1 、 v_2 条件下的风力发电机组运行特性曲线,曲线 1 和 2 分别为不同风速下基于最佳叶尖速比的最大功率追踪运行曲线和超速减载运行曲线。假定当时环境风速为 v_1 ,则风力发电机组的 A 点和 B 点分别为 v_1 风速下的最大功率追踪和超速减载的稳定运行工作点,曲线 BCDE 为 DFIG 退出最大功率追踪模式,并以超速减载模式参与调频经历的动态过渡过程,其中 BCD 阶段为参与调频瞬间及动能功率释放,以及转速跌落的过程;DEB 为退出调频后转速逐渐恢复的过程。

如图 1 所示,DFIG 超速减载运行的输出功率 P' 与减载率 d 有关,具体为:

$$P' = (1 - d) P_{MPPT} \quad (3)$$

此时转动部分具有的动能为:

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_r^2 \quad (4)$$

式中 J 为风轮和风机转子整体的转动惯量。在转动角速度 ω_r 降低时,其释放出的动能 P_E 为动能 E_k 对时间的导数,如式(5)所示。

$$P_E = \frac{dE_k}{dt} = J \omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

由于 DFIG 的转动惯量较小在参与调频时由于

能量的快速消耗会使得转速迅速下降,并可能触发转速恢复机制^[24]。此时 DFIG 不仅退出调频,并且还会从系统吸收功率来恢复转速^[25],这显然会导致 DFIG 的输出功率下降,进一步恶化系统的功率缺额,导致更加严重的频率二次跌落。

DFIG 参与调频可能引发的频率二次跌落过程如图 2 所示,假定 t_0 时刻前 DFIG 以超速减载方式运行, t_0 时刻系统负荷突然增加导致频率下降,此时 DFIG 释放转子动能与传统机组共同参与调频,将频率最低点限制在 f_{N2} ,但随着 DFIG 转速由于能量输出不断下降,假定在 t_1 时刻转速降到允许范围最低点,触发 DFIG 转速恢复。此时,DFIG 不再参与调频,这将导致系统功率受扰,频率再次跌落,并在 t_{N2} 时刻下降到比 f_{N2} 更低的 f_{N1} 点, f_{N1} 点可能超出系统允许范围,导致系统失稳。

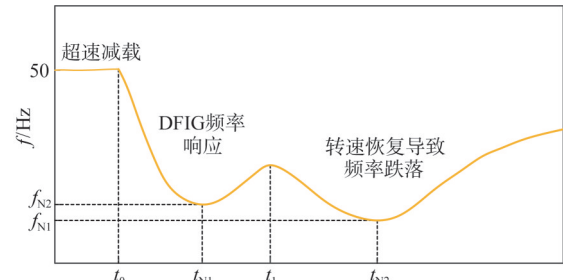


图 2 频率的二次跌落现象

Fig. 2 Secondary drop in frequency

通过以上对超速减载调频原理分析可知,超速减载的控制手段虽然能够使 DFIG 具有一定的调频能力,但受限于减载范围和转速稳定限制,其调频能力较弱且容易导致系统失稳,不利于系统稳定运行。

2 基于超级电容器的 DFIG 调频策略

2.1 配置超级电容器的 DFIG 调频系统设计

为了避免调频过程中发生频率二次跌落,提高 DFIG 自身的调频能力,本文选用超级电容器并通过 DC/DC 变流器接口来提供 DFIG 参与调频所需能量;基于超级电容器的 DFIG 调频系统原理图如图 3 所示,图中 P_m 为 DFIG 捕获的机械功率, P_e 为 DFIG 定转子输出总有功功率, P_s 、 P_r 分别为 DFIG 定子侧、转子侧的有功功率输出, P_g 为网侧变流器的有功功率, U_{dc} 为直流母线电压, P_{sc} 为超级电容器输出的有功功率。转子侧变流器通过对 DFIG 转

子励磁, 实现变速恒频运行并控制机端有功、无功功率的输出, 网侧变流器实现与电网功率交换以维持直流母线电压的稳定, 保证 DFIG 输出的电能质量。

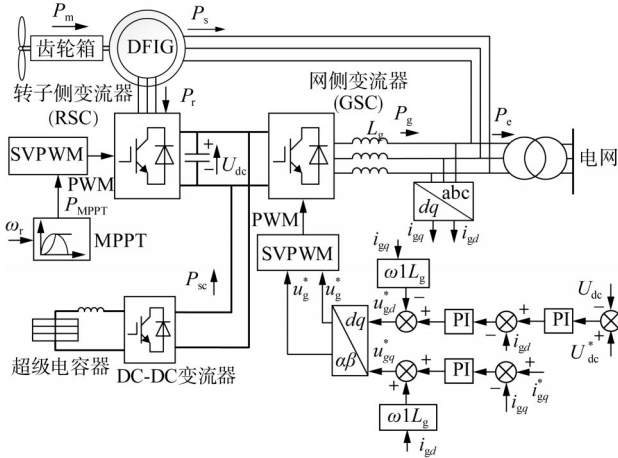


图 3 基于超级电容器的 DFIG 调频系统原理图

Fig. 3 Principle diagram of DFIG frequency modulation system based on supercapacitor

在超级电容器输出调频能量时, 转子侧变流器仍可采用最大功率跟踪控制方式, 可保证运行的最大经济收益; 网侧变流器通常工作在直流母线电压控制模式, 在亚风速下从电网吸取功率, 超风速下向电网馈入功率。当超级电容器输出或吸收调频能量时, 通过改变直流母线电压参与调频。

2.2 附加调频控制及其功率需求

为使 DFIG 在参与调频时能具有类似同步发电机的惯性和调频特性, 起到良好的调频作用, 本文借鉴较为成熟的附加综合惯性控制手段^[26-27]来确定 DFIG 需要输出的调频功率, 其中包含虚拟惯量和频率下垂控制需要的两部分能量。

由传统同步发电机摇摆方程可确定虚拟惯量控制需要的惯性功率 ΔP_E 为:

$$\Delta P_E = \frac{2H_{\text{DFIG}} P_n}{f_s} \frac{df}{dt} = K_E \frac{df}{dt} \quad (6)$$

式中: H_{DFIG} 为 DFIG 惯性时间常数; P_n 为 DFIG 装机容量; f_s 为系统额定频率; K_E 为虚拟惯量控制的增益系数; df/dt 为系统频率的变化率。

类比同步发电机一次调频的原理, 超级电容器采用下垂控制参与调频时, 其需要输出的有功功率 ΔP_G 为频率偏差的比例响应, 为:

$$\Delta P_G = -K_G \Delta f \quad (7)$$

式中: K_G 为频率下垂控制的增益系数; Δf 为系统频率的偏差量。

综合虚拟惯量和频率下垂控制的输出功率, 即可使 DFIG 表现出同步发电机的调频特性, 由此得到超级电容器需输出的功率参考值 P_{sc} 为:

$$P_{sc} = \Delta P_E + \Delta P_G \quad (8)$$

该功率需求可通过控制 Buck-Boost 变流器释放超级电容器的电能来获得, 其控制原理如图 4 所示。

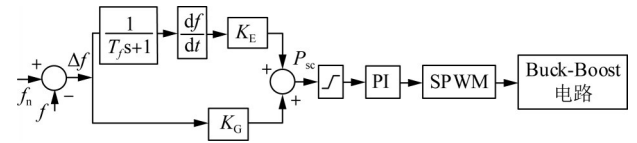


图 4 双向 Buck-Boost 电路控制原理图

Fig. 4 Bidirectional Buck-Boost circuit control schematic

2.3 Buck-Boost 电路及超级电容器配置设计

2.3.1 Buck-Boost 电路设计

在基于超级电容器的 DFIG 调频系统中, 双向 DC-DC 变流器是提高超级电容器容量利用率、实现超级电容器与系统功率交换的关键部件, 其功率变换效果对提升 DFIG 调频能力十分重要。在各种 DC-DC 变流器中, 非隔离型半桥 Buck-Boost 变流器拓扑简单, 能量传递效率高且易于实现控制^[28], 适合出力频繁且功率较大的调频场景。本文选择 Buck-Boost 变流器作为超级电容储备能量的接口, 实现调频功率的供给和调整, Buck-Boost 变流器主拓扑原理如图 5 所示。

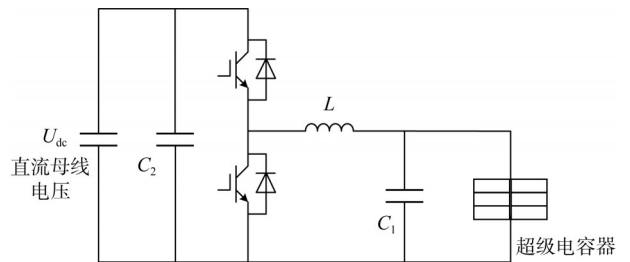


图 5 Buck-Boost 变流器工作原理图

Fig. 5 Buck-Boost converter working principle diagram

正常工作时, 超级电容通过控制 Buck-Boost 变流器从系统吸收并储存部分能量; 当负载扰动发生时, 超级电容将协同网侧变流器通过 Buck-Boost 变流器从系统吸收或释放能量。

2.3.2 超级电容器阵列电压的确定

DFIG 参与调频过程中, 变流器两端电压差值

会直接影响变流器的工作效率,两端电压越接近,变流器的变换效率越高^[28]。由于DFIG直流母线电压是确定的,为保证Buck-Boost变流器较高的变换效率,超级电容器的工作电压应与直流母线电压接近,故本文根据直流母线电压来配置超级电容器,使其最高工作电压与母线电压相等。

2.3.3 超级电容器功率及容量配置

为保证DFIG满足系统调频需求,所配置超级电容器阵列的容量和功率需满足调频的要求。根据文献[30]可知,设计良好的Buck-Boost变流器变换效率可达到95%以上,考虑到超级电容器自身和变流器的损耗,取超级电容器充放电效率为95%。具体的超级电容器配置步骤如下。

假设所需超级电容器的阵列最高工作电压为 U_{SCmax} 、单体超级电容器额定工作电压为 U_{cell} ,则所需串联的超级电容器单体数量 N_s 为:

$$N_s = \frac{U_{SCmax}}{U_{cell}} \quad (9)$$

并联的单体数量需从功率和能量两方面来确定。超速减载通常预留10%的有功备用,为达到更好的调频效果,超级电容器阵列的可持续输出功率按照10%的装机容量来约束。超级电容器阵列的可持续功率为最小工作电压 U_{SCmin} 与最大可持续工作电流 I_{max} 的乘积。在串联数量确定的情况下,并联的数量 N_p 为:

$$N_p = \frac{0.1P_n}{U_{SCmin} I_{max}} \quad (10)$$

能量约束需要满足系统对于DFIG参与调频的要求。DFIG参与调频的时间一般不大于30s,为保证超级电容器阵列有较强的调频能力,本文按照10% P_n 调频功率持续输出30s所需能量作为超级电容器阵列的能量配置目标 E_{sc} 。

$$E_{sc} = 0.1P_n \times 30 \quad (11)$$

超级电容器的可充入/放出的能量由最大工作电压 U_{SCmax} 、最小工作电压 U_{SCmin} 和电容值 C 共同确定。

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C (U_{SCmax}^2 - U_{SCmin}^2) \quad (12)$$

根据式(12)求得所需电容值 C 的大小,即可求得电容器组所需并联的单体数量为:

$$N_p = \frac{C}{C_s} \quad (13)$$

式中 C_s 为 N_s 个单体串联后的等效电容值。

为达到较好的调频效果,并联数量取功率和能量约束计算所得的较大整数。

2.3.4 下垂控制和虚拟惯量参数设计

根据GB/T15945《电能质量电力系统频率允许偏差》的要求,我国电力系统的频率偏差允许值为 $\pm 0.2 \text{ Hz}$ ^[31]。为满足系统的调频要求,需要DFIG在频率偏差临界值时释放最大调频功率,本文设定在频率偏差为0.2 Hz时输出最大调频功率 $0.1P_n$,此时下垂系数 K_G 为:

$$K_G = \frac{0.1P_n}{0.2} = \frac{1}{2} P_n \quad (14)$$

根据我国电力系统安全稳定运行的规范和要求^[32],最大允许频率变化率为 $\pm 0.5 \text{ Hz/s}$,风电机组惯性时间常数 H_{DFIG} 通常为5s,此时虚拟惯量系数 K_E 为:

$$K_E = \frac{2H_{DFIG}P_n}{f_s} = \frac{1}{5} P_n \quad (15)$$

3 仿真实验及经济性分析

3.1 仿真模型及参数

为验证本文所提基于超级电容器的DFIG改进调频策略的有效性和优越性,本文基于MATLAB/Simulink仿真平台建立了由DFIG和同步发电机组成的微电网模型,分别进行了不同DFIG调频方法的对比仿真实验,以及在连续大功率扰动下基于超级电容器的DFIG的调频能力验证仿真实验,对本文所提改进调频策略进行仿真实验。

图6为DFIG和同步发电机组成的微电网仿真系统拓扑图,其中G1代表传统火电厂,由850 MW同步发电机组组成,DFIGs代表由100台1.5 MW双馈风机组成的风电场,按照本文方法为其配置超级电容器,所选超级电容器参数如表1所示,风电场风速为11.5 m/s,此微电网系统的风电渗透率为15%,L1、L2、L3、L4为微网中的负荷,分别为800 MW、30 MW、50 MW、60 MW,起初L1和L4接入系统。

3.2 基于超级电容器的DFIG调频能力验证

为验证本文所提方法对动态频率支撑的有效性和优越性,分别采用电化学储能装置、超速减载10%和基于超级电容器3种DFIG参与调频的方式进行了仿真对比实验。假定系统初始工作状态稳定,1.5 s时将负荷L2接入,使系统产生30 MW的

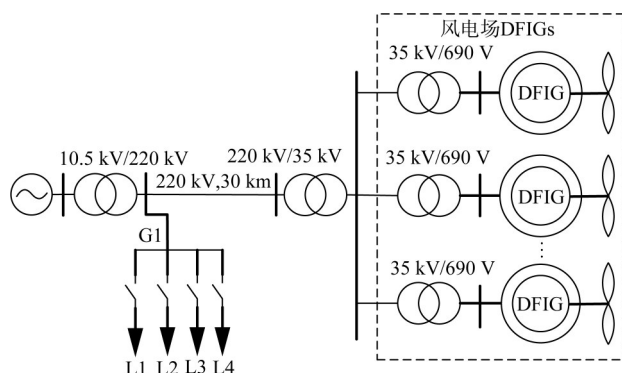


图6 仿真基于的DFIG风电场—同步发电机微网系统

Fig. 6 Simulation based on DFIG wind farm-synchronous generator microgrid system

表1 BCAP3000超级电容器各项参数

Tab. 1 BCAP3000 supercapacitor parameters

储能形式	参数	数值
超级电容器	型号	BCAP3000
	标称容值 C_{cell}/F	3 000
	最大工作电压 $U_{\text{cellmax}}/\text{V}$	2.7
	最小工作电压 $U_{\text{cellmin}}/\text{V}$	1.2
	最大连续工作电流 I_{max}/A	160
	重量/kg	0.51
	尺寸/mm	$\Phi 60 \times 139$
	功率密度 $/(W \cdot \text{kg}^{-1})$	5 900
	能量密度 $/(Wh \cdot \text{kg}^{-1})$	6.0

功率缺额, 系统频率变化仿真结果如图7所示, 其中电化学储能装置方案采用与本文所提方案相同的拓扑结构, 所配容量与超级电容器容量相等。

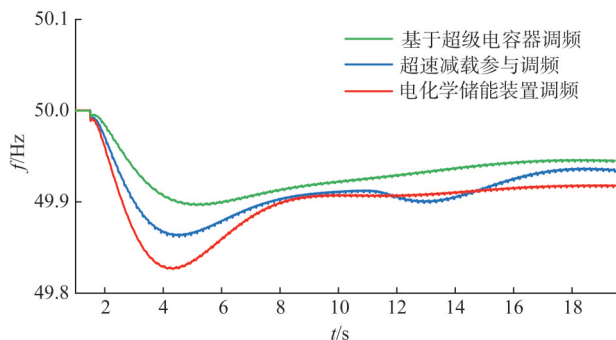


图7 不同调频方式下的频率响应曲线

Fig. 7 Frequency response curves under different frequency modulation modes

从图7中可以看出, 有功负荷突增30 MW时, DFIG采用电化学储能装置调频时最大频率偏差量约为0.17 Hz, 稳态偏差约为0.09 Hz; 以超速减载

方式参与调频时最大频率偏差量约为0.14 Hz, 稳态偏差约为0.07 Hz; 在基于超级电容器方式参与调频时, 最大频率偏差量约为0.1 Hz, 稳态偏差约为0.05 Hz, 较采用电化学储能装置和超速减载调频性能分别提升约45 %和28 %。

为验证本文所提方法在系统较大功率扰动下的优越性, 1.5 s时将负荷L3接入, 使系统产生50 MW的功率缺额。DFIG采用以上3种方式参与调频的系统频率变化结果如图8所示。DFIG超速减载10 %参与调频时转速最低允许值为0.7 p. u.。

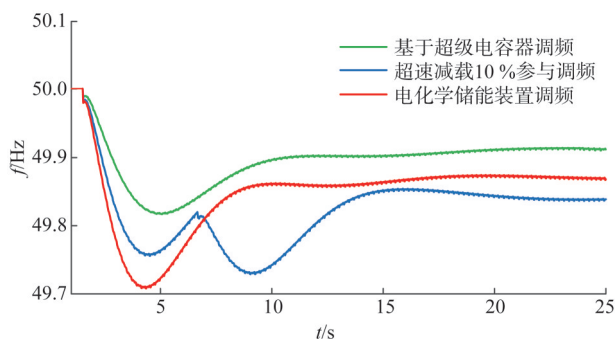


图8 两种调频方式下频率响应曲线

Fig. 8 Frequency response curves under two frequency modulation modes

从图8中可以看出, 有功负荷突增50 MW时, DFIG采用电化学储能装置调频时最大频率偏差量为0.29 Hz; 以超速减载10%方式参与调频时发生严重的频率二次跌落, 最大频率偏差量约为0.27 Hz; 在基于超级电容器的方式参与调频时并没有发生频率二次跌落, 最大频率偏差量约为0.18 Hz, 较采用电化学储能装置和超速减载调频性能分别提升约38 %和33 %。

显然, 相同容量下基于电化学储能的DFIG调频能力较弱, 这是由于电化学储能机理和输出特性差异造成的。目前常用电化学储能装置在相同容量下其最大充放电功率仅为超级电容器的几分之一^[20], 若要满足功率需求需要增加数倍于超级电容器的投资成本; 另外, 考虑到可再生能源调频的特殊性, 瞬时大功率输出调频能量对于调频效果十分重要; 相比之下, 超级电容器具有更高的功率密度和循环寿命, 比电化学储能装置更适合需要频繁较大功率充放电的调频场景。

3.3 基于超级电容器的DFIG连续调频能力验证

为验证基于超级电容器的DFIG连续动态调频

能力及鲁棒性,在所搭建的微网系统中,1 s时将L3接入,25 s时将L4切除,系统频率变化仿真结果如图9所示。

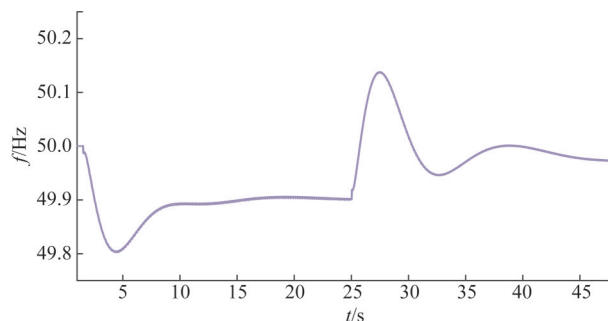


图9 系统负荷连续扰动下的系统频率响应

Fig. 9 System frequency response under continuous disturbance of system load

从图9中可以看出,1 s时有功负荷突增50 MW,系统频率最低跌落至大约49.82 Hz,然后稳步恢复至大约49.92 Hz;25 s时有功负荷突减60 MW,系统频率最高上升至大约50.16 Hz,然后稳步恢复至50 Hz左右;调频过程中系统频率没有发生二次跌落,系统稳定运行。

通过以上仿真实验可以看出,在系统运行过程中,系统频率上升时可控制超级电容充电参与调频;在频率下降时可控制超级电容放电参与调频,稳态运行时通过控制可保持超级电容留有适宜的荷电量备用。在系统整个运行过程中,基于超级电容器参与调频的DFIG具有良好的连续动态调频能力及鲁棒性,能够保证系统稳定运行。

3.4 DFIG配置超级电容器和超速减载经济性对比

1.5 MW的DFIG直流母线额定电压为1 200 V,按照本文的配置方案,单台DFIG所需超级电容器单体数量为890,串联数量为445,并联数量为2,此时阵列的容量为所需的1.74倍,在调频时能够提供更加充裕的能量,提升DFIG调频性能。

BCAP3000型超级电容器的循环寿命约为一百万次,可供DFIG参与调频使用数年之久,单体约为300元,所配置超级电容器阵列的总体价格约为30万元。由文献[33]可知1.5 MW的DFIG超速减载运行的年发电效益损失达30万元。综合考虑可以看出,虽然安装超级电容器的一次性投入较高,但从DFIG的全生命周期来看,比超速减载策略具有更好的经济性。

4 结论

本文主要对双馈风机参与调频的调频策略和技术方案展开研究,针对传统DFIG超速减载参与调频导致频率二次跌落的问题,重点分析了造成系统频率二次跌落的原因和影响,提出了一种利用超级电容器作为能量来源代替DFIG超速减载参与调频的技术方案和控制策略,将超级电容器阵列经Buck-Boost变流器并联在DFIG直流母线上,通过控制超级电容器阵列充放电来改变DFIG的输出功率参与系统调频,避免了调频过程中频率二次跌落,同时提高了DFIG的发电效益,具有较好的经济性。通过理论分析和仿真验证,得出如下结论。

1)DFIG以超速减载的方式参与调频时,转速的快速下降和风速的不确定性使DFIG在调频过程中容易触发转速恢复机制,引起DFIG的输出功率骤降,导致系统频率二次跌落。

2)本文所设计的利用超级电容器替代超速减载的DFIG调频策略能有效地避免频率二次跌落,使DFIG能够在全风速下参与调频,提高了DFIG的调频能力,并具有较好的性价比。

3)本文所提技术路线和方法,能为其他类型新能源机组的调频能力提供有益参考。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 姜超,蔡国伟,杨冬峰,等.基于双馈风电机组频率响应解析模型的系统低频减载策略[J].电力系统自动化,2023,47(21):108-118.
JIANG Chao, CAI Guowei, YANG Dongfeng, et al. Under-frequency load shedding strategy for power system based on analytical frequency response model of doubly-fed wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 108-118.
- [3] TIELENS P, VAN HERTEM D. The relevance of inertia in power systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(55): 999-1009.
- [4] WANG Z, WU W. Coordinated control method for DFIG-based wind farm to provide primary frequency regulation service[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), September 22, 2017, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE, 2020: 2644-2659.
- [5] 张剑云,李明节.新能源高渗透的电力系统频率特性分析

- [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498 – 3507.
- ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498 – 3507.
- [6] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183 – 6192.
- SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183 – 6192.
- [7] 全国电力监督标准化技术委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [8] 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.
- [9] ATTYA A B T, HARTKOPF T. Control and quantification of kinetic energy released by wind farms during power system frequency drops[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(3): 210 – 224.
- [10] 戴仲覆, 陈刚, 赵利刚, 等. 一种适用于电网高频问题的风机虚拟惯量控制策略[J]. 南方电网技术, 2018, 12(5): 56 – 61, 70.
- DAI Zhongfu, CHEN Gang, ZHAO Ligang, et al. A wind turbine virtual inertia control strategy for high frequency problems in power systems [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(5): 56 – 61, 70.
- [11] 陶玉昆, 杨飞飞, 和萍, 等. 考虑频率二次跌落和转速恢复的风电机组柔性频率响应策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 60 – 68.
- TAO Yukun, YANG Feifei, HE Ping, et al. Flexible frequency response strategy for wind turbines considering secondary frequency drop and rotational speed recovery [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 60 – 68.
- [12] 张雯欣, 吴琛, 黄伟, 等. 考虑频率二次跌落的系统频率特征评估及风电调频参数整定[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 11 – 19.
- ZHANG Wenxin, WU Chen, HUANG Wei, et al. Evaluation of system frequency characteristic and parameter setting of frequency regulation for wind power considering secondary frequency drop [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 11 – 19.
- [13] 唐飞, 元君锋, 谢家锐, 等. 避免频率二次跌落的风储联合调频控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3824 – 3836.
- TANG Fei, QI Junfeng, XIE Jiarui, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3824 – 3836.
- [14] LIU K, QU Y, KIM H M, et al. Avoiding frequency second dip in power unreserved control during wind power rotational speed recovery [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3097 – 3106.
- [15] 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. Coordinated control strategy of wind power and energy storage in frequency regulation based on torque limit control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4982 – 4990.
- [16] 王同森, 程雪坤. 计及转速限值的双馈风机变下垂系数控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 29 – 36.
- WANG Tongsen, CHENG Xuekun. Variable droop coefficient control strategy of a DFIG considering rotor speed limit [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 29 – 36.
- [17] 赵熙临, 李品, 付波. 基于多目标优化的风储协同一次调频控制策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 68 – 76.
- ZHAO Xilin, LI Pin, FU Bo. Primary frequency regulation control strategy with wind-storage cooperation based on multi-objective optimization [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 68 – 76.
- [18] 刘巨, 姚伟, 文劭宇, 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 wind farm virtual inertia compensation strategy based on energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1596 – 1605.
- [19] BERRUETA A, SAN MARTÍN I, SANCHIS P, et al. Lithium-ion batteries as distributed energy storage systems for microgrids [J]. Distributed Energy Resources in Microgrids, 2019: 143 – 183.
- [20] 刘鑫, 李欣然, 谭庄熙, 等. 基于不同种类储能电池参与一次调频的最优策略经济性对比[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1403 – 1410.
- LIU Xin, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Economic comparison of optimal strategies based on different types of energy storage batteries participating in primary frequency regulation [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1403 – 1410.
- [21] 陈建斌, 胡玉峰, 吴小辰. 储能技术在南方电网的应用前景分析[J]. 南方电网技术, 2010, 4(6): 32 – 36.
- CHEN Jianbin, HU Yufeng, WU Xiaochen. Investigation into application prospects of energy storage technologies proposed for China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(6): 32 – 36.
- [22] BERRUETA A, SACRISTÁN J, LÓPEZ J J L, et al. Inclusion of a supercapacitor energy storage system in DFIG and full-converter PMSG wind turbines for inertia emulation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(3): 3754 – 3763.
- [23] CHEN C, SU Y, YANG T, et al. Virtual inertia coordination control strategy of DFIG-based wind turbine for improved grid frequency response ability [J]. Electric Power Systems Research, 2023(216): 109076.
- [24] LIU K, QU Y, KIM H M, et al. Avoiding frequency second dip in power unreserved control during wind power rotational speed recovery [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3097 – 3106.
- [25] SUN M, MIN Y, CHEN L, et al. Optimal auxiliary frequency control of wind turbine generators and coordination with synchronous generators [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 78 – 85.
- [26] 乔颖, 郭晓茜, 鲁宗相, 等. 考虑系统频率二次跌落的风电机组辅助调频参数确定方法[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 807 – 815.

- QIAO Ying, GUO Xiaoqian, LU Zongxiang, et al. Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering secondary frequency drop [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 807–815.
- [27] 高晖胜, 瞿鹏, 黄林彬, 等. 能量约束下电力电子并网装备的最优频率控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 9–18.
- GAO Huisheng, ZI Peng, HUANG Linbin, et al. Optimal frequency control of grid-connected power electronic devices with energy constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 9–18.
- [28] 龚春阳, 林嘉伟, 黄冬梅, 等. 储能系统双向 Buck-Boost 变换器控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 229–238.
- GONG Chunyang, LIN Jiawei, HUANG Dongmei, et al. Research on control strategy of bidirectional buck-boost converter in energy storage system [J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(2): 229–238.
- [29] SINGH A K, MISHRA A K, GUPTA K K, et al. High voltage gain bidirectional DC-DC converters for supercapacitor assisted electric vehicles: a review [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2022, 7(4): 386–398.
- [30] 张璐源. 双向 DC/DC 变换器效率优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [31] 全国电压电流等级和频率标准技术委员会. 电能质量 电力系统频率偏差: GB/T15945—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [32] 刘洪波, 张崇, 孙同, 等. 高风电渗透率下考虑电网频率支撑需求的储能系统配置方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 36–43.
- LIU Hongbo, ZHANG Chong, SUN Tong, et al. Configuration method of energy storage system considering grid frequency support demand under high wind power penetration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 36–43.
- [33] YUNUS A M S, MASOUM M A S, ABU-SIADA A. Application of SMES to enhance the dynamic performance of DFIG during voltage sag and swell [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(4): 5702009.

收稿日期: 2024-01-30; 网络首发日期: 2024-06-24

作者简介:

李志军(1964), 男, 教授, 博士, 研究方向为新能源发电技术、电力系统稳定与控制技术, zhijun_li@263.net;
刘士杰(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源设备参与电网调频的控制与分析, 929636767@qq.com;
邱春阳(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源及其控制技术。

(上接第 26 页 Continued from Page 26)

- ZHANG Jie, LUO Junjie. Parameter identification of photovoltaic modules based on TS-FOA [J]. Computer Technology and Development, 2022, 32(6): 15–20.
- [23] 苏海军. 量子衍生和禁忌微分进化算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [24] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [25] 卢文平, 吴林林, 刘辉. 基于状态识别和遗传算法的双馈风电机组参数辨识方法[J]. 华北电力技术, 2014(7): 6–9.
- LU Wenping, WU Linlin, LIU Hui. Parameter identification method based on state identification and genetic algorithm of double fed wind generator [J]. North China Electric Power, 2014(7): 6–9.
- [26] 沈可心, 薛博文, 朱晓荣. 直流微网中直驱风机的类虚拟同步发电机惯性控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2526–2535.
- SHEN Kexin, XUE Bowen, ZHU Xiaorong. Inertia control strategy of direct-driven wind generation system in DC microgrid based on analogous virtual synchronous generator [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2526–2535.
- [27] 朱益华, 罗超, 余佳微, 等. 全功率直驱风电网友好型控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 177–187.
- ZHU Yihua, LUO Chao, YU Jiawei, et al. Grid-friendly control strategy of full power rated direct drive wind turbines [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 177–187.
- [28] 唐文秀. 基于改进禁忌搜索算法求解 TSP 问题[J]. 科学技术创新, 2022(4): 154–157.
- TANG Wenxiu. Solving TSP problem based on improved tabu search algorithm [J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(4): 154–157.

收稿日期: 2024-01-26; 网络首发日期: 2024-10-26

作者简介:

高琴(1992), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制;
张建新(1983), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 从事电力系统稳定分析与风险管理;
周运红(1994), 男, 通信作者, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力电子系统控制, zhouyunhong1234yy@126.com。