

基于虚拟同步和转速限制的飞轮储能双馈电机调相系统的频率支撑技术

寇建¹, 刘宏勇¹, 于维耀², 戴嘉庚¹, 姚芳²

(1.国网冀北张家口风光储输新能源有限公司, 河北 张家口 075000; 2.河北工业大学 电气工程学院 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300401)

摘要: 电网频率跌落时,并网双馈电机向电网补偿有功功率,对电网频率具有一定的支撑或抬升作用,但频率跌落期间,双馈电机转子转速下降快且不可控、有功补偿及频率支撑的时长有限,无法保障双馈电机稳定运行。文章提出了一种基于虚拟同步和转速限制的飞轮储能双馈电机频率支撑技术,该技术首先在双馈电机转子转轴上外挂飞轮,增大了系统惯量,增加机械储能,延缓频率跌落过程中转子下降速率;其次,在电网频率跌落时,通过虚拟同步控制策略进行有功功率的实时补偿,基于转子转速下限值的动态控制,调控有功功率的补偿时间,配合飞轮储能实现有功补偿时长的优化控制;最后,在 Matlab/Simulink 中对调相系统频率支撑技术的有效性进行验证。

关键词: 双馈电机; 频率跌落; 有功补偿; 飞轮储能; 虚拟同步

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)02-0252-08

0 引言

双馈电机采用有功、无功独立解耦控制策略调频调相,但减小了系统的等效惯量,还削弱了电网频率与转速之间的耦合关系,导致并网双馈感应发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)无法及时响应频率变化。大规模接入无调频能力的双馈风力发电机后,电网的一次调频压力显著增加。因此,研究 DFIG 高效灵活的有功补偿技术,对提高一次电网调频能力具有重要的意义^[1,2]。

目前,双馈电机的调频主要采用超速控制、变桨控制、虚拟惯量控制和虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制策略。文献[3]采用与变桨控制结合的超速控制策略,有效提高了系统的频率稳定性,但并没有解决由于超速控制产生的经济性降低的问题。文献[4]提出双馈风机变减载率超速控制技术,既减少了超速控制成本,又抑制了微电网频率的动态偏差,但该控制技术不适用于高风速运行工况。文献[5]设计了双馈风机自适应变桨距控制技术,使其在高风速运行时能维持基本稳定的输出功率,但该技术要外接变桨距装置,且控制较为复杂。文献[6]提出了

一种永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSG)的虚拟电容控制策略,旨在提供更多的虚拟惯性,并利用转子动能提供快速的功率支撑。文献[7]提出了基于选择函数的虚拟惯量综合控制技术,增加了系统的等效转动惯量,改善了系统频率的动态响应特性,但虚拟惯量控制下响应持续时间短,且易发生频率的二次跌落。

VSG 控制响应速度快,抑制频率变化能力强,抗扰动力强,对电网调频具有更好的适应性^[8,9],但要配置储能单元。飞轮储能装置因其具备转换效率高、功率大、响应快、寿命长、维护简单、环境特性友好等特点,能与电机出力形成有效互补关系,并为系统提供额外的惯量支撑作用,提高了双馈电机转子的可控性^[10-13]。本文针对飞轮储能双馈电机调相系统,提出了一种基于虚拟同步控制和转速下限值动态配置的有功补偿及频率支撑策略。通过虚拟同步控制实现调相机与电网的频率协调与有功补偿,通过外挂飞轮和转速下限值动态配置,对双馈电机转子转速下降的速率及有功补偿的时长进行优化控制,确保双馈电机对电网的频率支撑的效果以及自身的稳定。

收稿日期: 2024-01-18。

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2022202056)。

通信作者: 姚芳(1972-),女,博士,教授,研究方向为新能源储能及智慧能源系统。E-mail: yaofang@hebut.edu.cn

1 双馈电机的频率支撑稳定性分析

1.1 双馈电机暂态数学模型

双馈电机定子绕组星接,定子绕组经升压变由耦合点接电网,转子绕组由集电环、电刷引出接变流器机侧,再接至升压变 690 V 低压侧,升压变 35 kV 高压侧并网。双馈电机的定子绕组、并网接线与并网等效电路如图 1 所示。

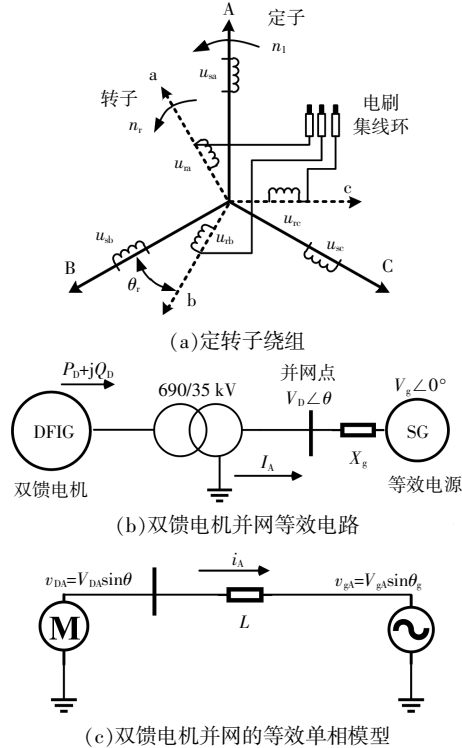


图 1 双馈电机定、转子绕组及并网等效电路
Fig.1 Stator and rotor windings and grid-connected equivalent circuit of doubly fed machine

电网故障频率跌落时,并网运行的双馈电机的电流、转速、有功功率变化会进入暂态过程,暂态过程依赖于电、磁、动力学耦合关系,主要涉及定、转子回路的 VCR 方程、电磁转矩方程和有功功率计算模型。

①静止坐标系下基于电压方程和磁链方程可推导出定、转子回路的 VCR 方程组为

$$\begin{cases} u_s = \left(R_s + L_s \frac{d}{dt} \right) i_s + L_m \frac{d}{dt} i_r \\ u_r = -j\omega_r L_m i_s + \left(R_r + j\omega_r L_r + L_r \frac{d}{dt} \right) i_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_s, u_r 分别为定、转子电压; R_s, L_s, R_r, L_r 分别为定子侧与转子侧的电阻和电感参数; L_m 为激磁电感; ω_r 为转子电角速度,即本文所述转子转速。

②电磁转矩等于转子轴上机械功率除以转子的机械角速度,用于支撑负载转矩和转子惯量。

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r / n_p} = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} + T_L \quad (2)$$

式中: T_e 为电磁转矩; P_m 为转子轴上输出的机械功率; n_p 为电机的极对数; ω_r / n_p 为转子机械角速度; J 为转子惯量; T_L 为负载转矩。

③双馈电机并网等效单相模型的有功功率为

$$P = \frac{3V_g V_D}{2X_g} \sin(\theta - \theta_g) \quad (3)$$

式中: V_g 为电网电压; V_D 为双馈电机并网点电压; X_g 为电网的等效电阻与等效电抗; θ 和 θ_g 分别为双馈电机相位与电网相位。

④转子的机械能量 E_k 、电机惯量 H 方程分别为

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

$$H = J \frac{(2\pi f_n / n_p)^2}{2S_n} \quad (5)$$

式中: S_n 为系统额定容量; f_n 为额定频率; n_p 为转子极对数。

⑤电机转子的运动方程为

$$\frac{d}{dt} \omega_r^* = \frac{1}{2H} T_e^* - \frac{1}{2H} T_L^* \quad (6)$$

式中: ω_r^* 为转子转速标么值; T_e^* 为电磁转矩标么值; T_L^* 为负载转矩标么值。

当电网电压跌落发生后,转矩失衡,电磁功率骤降,为支撑电网频率应迅速释放转子动能,转速在式(6)约束下振荡衰减。同时,定子磁链出现较大暂态分量,转子的高速旋转导致转差率的增大,进而产生转子电压、电流增量,严重时损坏转子励磁变流器。因此,应对转速和电流进行稳定性控制,以确保转速控制在转子可以承受的应力范围、电流暂态冲击不超过变流器的限制。

1.2 双馈电机的有功补偿与频率支撑的相关性分析

在电网频率跌落时, θ_g 与电网频率成正比,故 θ_g 减小, X_g 也伴随频率减小, P 增大。故双馈电机并网后当电网频率跌落时,会向电网补偿有功,进而实现频率支撑作用。但双馈电机转子储存的机械能量小、惯量 J 小,电机惯量 H 小,转速降低

快,双馈电机没有足够的时长向电网补充有功功率。

因此,通过增加转子惯量、增大双馈电机的系统惯性时间常数,可以影响转子的运动方程,抑制转子的转速变化速率,延长有功补偿的时长^[14-16];通过设置转子转速下限值作为有功补偿的终止条件,可以适度控制双馈电机向电网释放机械能量的时长,起到灵活的电网频率支撑作用。

2 基于转速控制与飞轮储能的双馈电机频率支撑技术

2.1 基于飞轮储能的双馈电机调相系统

为提高双馈电机的频率支撑能力,本文设计了基于飞轮储能的双馈电机调相系统,其主回路如图2所示。

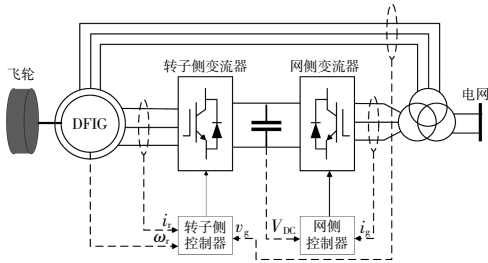


图2 双馈电机调相系统主回路

Fig.2 Main circuit of doubly fed machine phase modulation system

由式(6)可知,双馈电机外挂飞轮后,系统惯量 H 增大,可以使转子的转速变化率降低,延长有功补偿时间,提高频率支撑能力。

2.2 基于虚拟同步和转速限制的双馈电机频率支撑策略

为进一步提高双馈电机的频率支撑能力,本文提出了基于转速约束与虚拟同步的双馈电机有功补偿控制策略,其核心关键为①利用虚拟同步技术,动态协同电机转子频率与电网频率,考虑虚拟同步角速度 ω 的变化率和其与电网额定频率 ω_n 的偏差对有功功率进行补偿和下垂控制;②由于双馈电机变流器容量的影响,双馈电机的转差率往往不大于 0.3,即转子转速 ω_r 不低于 ω_{min} ,通过设置转速下限值 ω_{min} ,使双馈电机运行在合理的转速范围。

双馈电机的有功功率 P_e 受到电网等值电抗 X_g 和电机电网相位差 δ 的影响,而 X_g 和 δ 取决于电网频率 ω_g :

$$\begin{cases} P_e = \frac{3V_g V_D}{2X_g} \sin\delta \\ \delta = \theta - \theta_g \\ \omega_g = 2\pi f_g = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,电网频率 ω_g 正常、双馈电机稳定运行时, $\theta < \theta_g, \delta < 0, P_e < 0$,双馈电机向电网补偿负的有功功率。电网频率跌落,转子转速降低、双馈电机向电网释放能量,双馈电机向电网补偿正的有功功率。

当转子角速度大于下限值 ω_{min} 时,双馈电机向电网发出的有功功率只受 ω 与 ω_n 的差值影响。此时,可充分发挥双馈电机的有功支撑作用,参考功率 P_{ref} 的标幺值设置为负的常数。当转子转速小于 ω_{min} 时,通过对转子角速度进行的 PI 控制,将其尽快稳定在 ω_{min} ,并停止有功补偿,恢复稳定的电动运行模式。

参考功率 P_{ref} 为

$$P_{ref} = \begin{cases} P_0, \omega_r - \omega_{min} > 0 \\ \left[k_p(\omega_r - \omega_{min}) + k_i \int (\omega_r - \omega_{min}) dt \right] \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_0 为双馈电机在电网频率未变化时稳态的有功功率; k_p, k_i 分别为 PI 控制环节的比例系数和积分系数。

根据感应电机的机械特性,对电机进行虚拟同步控制,控制方程为

$$\begin{cases} D_1 \frac{d\omega}{dt} = T_{ref} - T_e - D_2(\omega_r - \omega_n) \\ T_{ref} = \frac{P_{ref}}{\omega_n} \\ T_e = \frac{P_e}{\omega_n} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω_n 为电网额定电角速度; D_1 为虚拟惯量常数; D_2 为虚拟阻尼常数; T_{ref} 为电磁转矩参考值。

由式(8),(9)可得有功功率的下垂控制方程:

$$P_e = P_{ref} - D_1 \omega_n \frac{d\omega}{dt} - \omega_n D_2 (\omega_r - \omega_n) \quad (10)$$

式中: P_e 为双馈电机向电网补偿的有功功率,其数值的大小与 P_{ref} 、虚拟同步转速 ω 的变化率(虚拟惯量)和补偿量 $-\omega_n D_2 (\omega_r - \omega_n)$ 有关,其中 $\omega_n D_2$ 为有功下垂系数。

当电网频率跌落, ω 随之降低,虚拟惯量 $-D_1 \omega_n d\omega/dt$ 和补偿量 $-\omega_n D_2 (\omega_r - \omega_n)$ 均为正值,二者

在第3秒时由50 Hz跌落至49.8 Hz;②频率连续跌落工况, 电网频率在3~6 s由50 Hz线性跌落至49.7 Hz。双馈电机外挂飞轮可增大系统的惯性时间常数 H 、减小转子转速下降速率。本文仿真模型根据实际1.5 MW 双馈电机调相系统构建, 无、有飞轮时的 H 分别为2 s和6 s。双馈电机转子转

速下限值可以在0.4~0.9 p.u.调整, 根据频率支撑对有功补偿的时长需求进行动态配置。

在有、无外挂飞轮两种情况下, 转子转速下限值分别为0.5 p.u. 和0.7 p.u.的两种补偿时长控制下, 有功功率和转子转速的仿真结果如图4,5所示。

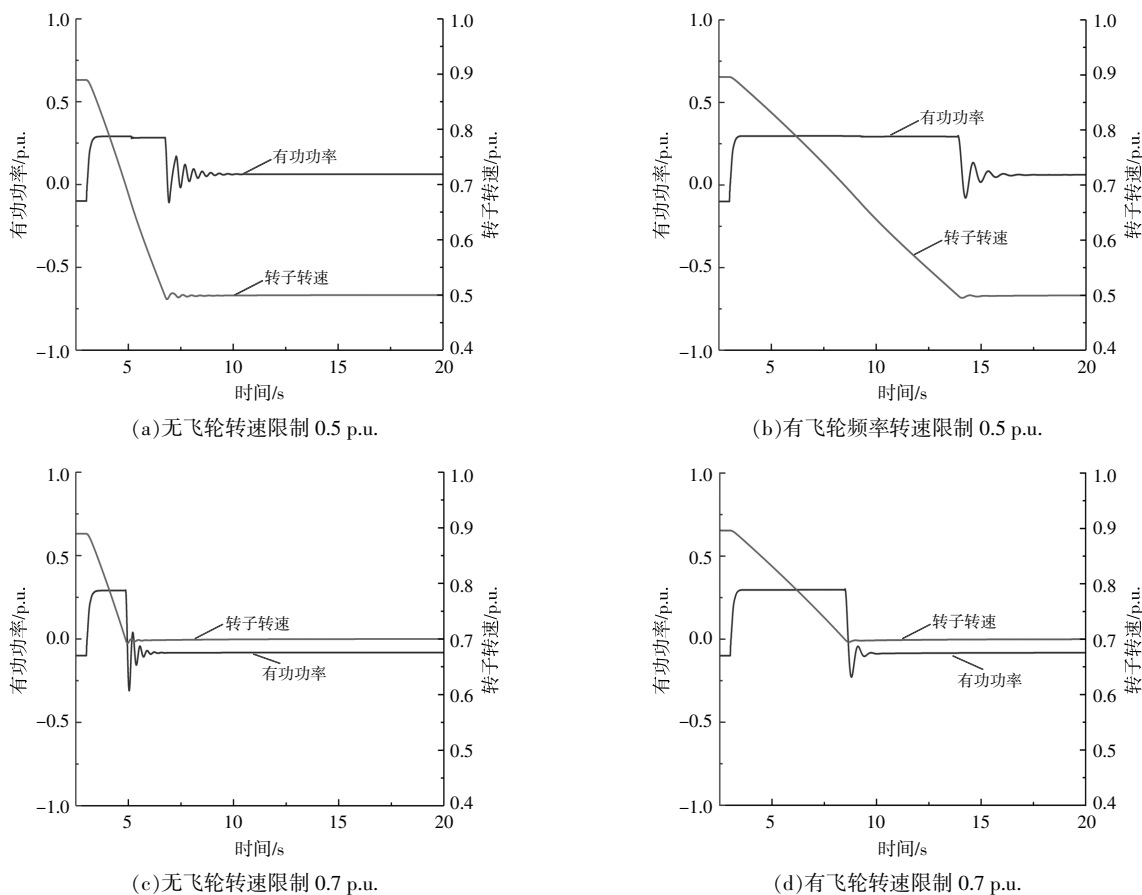
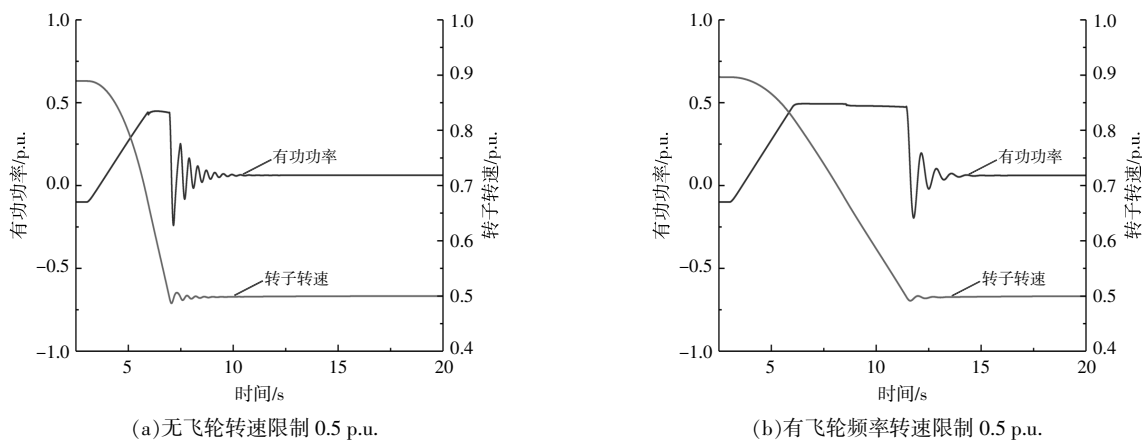


图4 频率阶跃跌落0.2 Hz 工况下的有功功率与转子转速的动态特性

Fig.4 Dynamic characteristics of active power and rotor speed under 0.2 Hz frequency step drop condition



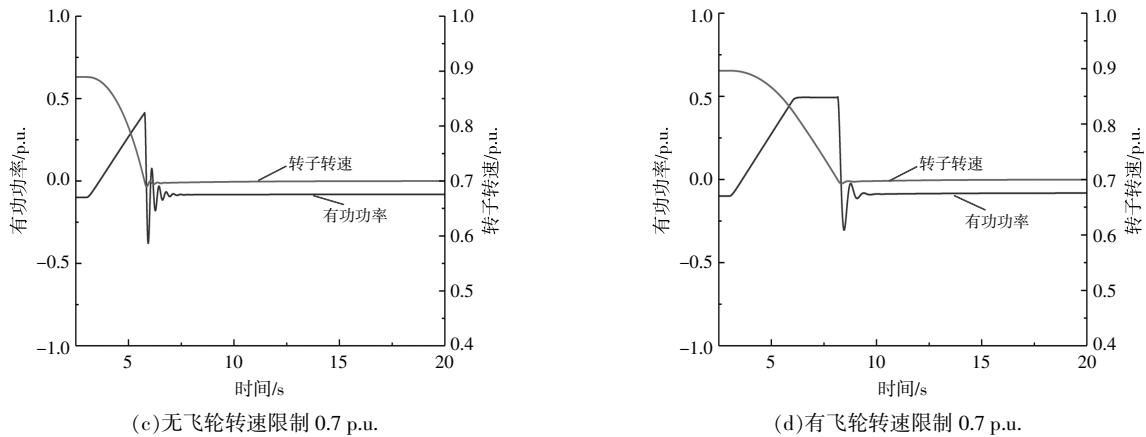


图5 电网频率3~6 s内线性跌落至49.7 Hz工况下的有功功率与转子转速的动态特性

Fig.5 Dynamic characteristics of active power and rotor speed under the condition of grid frequency falling linearly to 49.7 Hz in 3~6 seconds

由图4,5可知:①频率阶跃跌落时,转子角速度线性下降,有功功率跳升至峰值平台,且其峰值与转速限值无关、与频率跌幅有关;频率线性跌落时,转子角速度抛物状下降,有功功率线性增大,其峰值与转速限值无关、与频率跌落终值有关;②转速限值为0.5 p.u.时,有功补偿的时间长;转速限值为0.7 p.u.时,有功补偿的时间短,即有功补偿的时长与转速限制直接相关;转速下限值分别为0.5,0.7 p.u.时,外挂飞轮可分别延长有功功率补偿时间分别为6.9,3.5 s,故外挂飞轮可显著延长有功功率补偿的时长;③双馈电机转速到达设定的下限值后,进入PI控制环节,此时双馈电机的

有功曲线与转速曲线会出现短时间的振荡,而飞轮抑制了有功曲线与转速曲线的振荡幅度与振荡时长,使得双馈电机应对频率跌落时有更高的稳定性与可控性。

3.3 电网频率跌落工况下有功功率与转子转速仿真

为研究电网频率跌落对转子转速变化率、电网频率跌落对有功补偿值和转速下限值对有功补偿时长的影响,在频率阶跃跌落和连续跌落多种工况下,仿真获取有功功率和转子转速曲线,获取转速变化率、补偿时长和有功功率峰值,结果如图6所示。

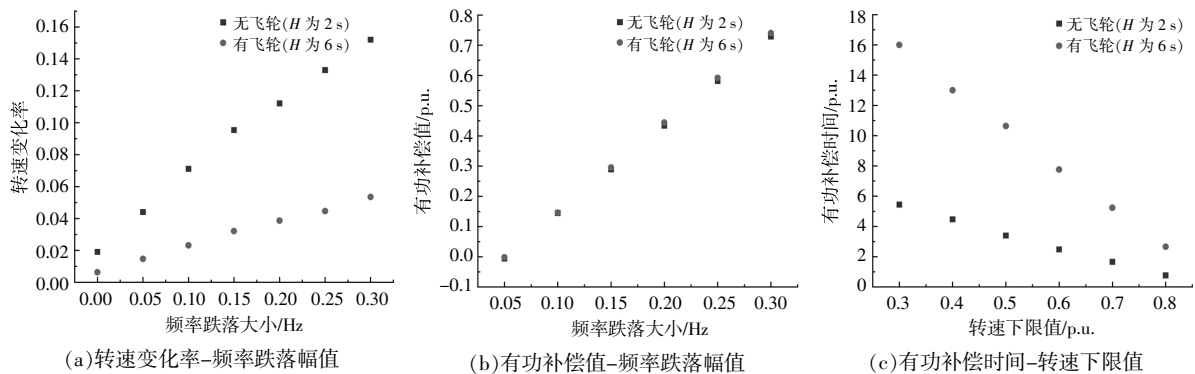


图6 飞轮储能双馈电机调相系统频率支撑效果的定量分析

Fig.6 Frequency support effect quantitative analysis on doubly fed machine phase modulation system with flywheel energy storage

由图6可知:转速变化率、有功补偿值均与电网频率的跌落幅值呈正比例关系,有功补偿时长随转速下限值的增大而线性缩短;飞轮外挂对于有功补偿值几乎没有影响,但可降低转速变化率、

延长有功补偿时间。因此,根据转速变化率-频率跌落幅值、有功补偿值-频率跌落幅值的线性关系和有功补偿时间-转速下限值关系,可通过改变转速下限值,动态改变有功补偿时长,动态掌控

调相机的频率支撑过程,助力实现灵活的频率的有功支撑。

4 结论

本文提出了飞轮储能与转速控制的有功补偿-频率支撑技术,并搭建了 Matlab/Simulink 系统仿真模型,仿真结果表明:

①对双馈电机进行虚拟同步控制、转速 PI 控制及转速下限值动态控制,可在实现电网频率跌落时有功功率补偿的同时,确保转子转速跌落至下限值后能快速稳定到该值附近;

②通过外挂飞轮增大电机系统惯性时间常数,可使双馈电机应对电网频率跌落时具有更低的转子转速跌落速率,可明显延长有功补偿时间;

③转速变化率和有功补偿值与电网频率跌落幅值呈正比,有功补偿时长随转速下限值的减小线性增大,双馈电机外挂飞轮,并配合转速下限值的动态控制,可进行动态有功补偿,实现灵活的一次调频。

参考文献:

- [1] 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):20-25,43.
- [2] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等.风力发电的调频技术研究综述[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4304-4314.
- [3] 李欣然,黄际元,陈远扬,等.大规模储能电源参与电网调频研究综述[J].电力系统保护与控制,2016,44(7):145-153.
- [4] 姜莹,边晓燕,李东东,等.基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J].电机与控制应用,2017,44(9):118-124.
- [5] 潘斌,彭嵩,余俊杰,等.考虑动态响应的虚拟发电厂频率-功率改进自适应下垂控制策略[J].电测与仪表,2023,60(4):92-98.
- [6] Zeng X,Liu T,Wang S,et al.Comprehensive coordinated control strategy of PMSG -based wind turbine for providing frequency regulation services[J].IEEE Access,2019(7):63944-63953.
- [7] 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):64-73.
- [8] Zhou Yu,Chen Chen,Ou Chuangang,et al. Frequency deviation-free compound control strategy for seamless mode transfer in microgrids based on VSG[J].Frontiers in Energy Research,2022(10):1-9.
- [9] Liu Andong,Liu Jun,Wu Qiong.Improvement of VSG transient performance based on power feedforward decoupling control [J].IET Generation,Transmission & Distribution,2022,16(20):4085-4095.
- [10] 刘颖明,徐中民,王晓东.考虑飞轮储能的风电场有功功率平滑控制[J].储能科学与技术,2015,4(2):194-197.
- [11] 张馨文.基于飞轮储能技术的双馈风电机组并网调频控制研究[D].南京:南京理工大学,2020.
- [12] 程亮,朱寰,郭岩,等.可再生能源虚拟同步发电机并网振荡模式及影响因素分析[J].可再生能源,2021,39(5):673-680.
- [13] 柴伦,李岚,李冰,等.基于改进虚拟同步发电机的预同步并网策略 [J]. 可再生能源,2019,37(7):1015-1020.
- [14] 张尔佳,邵能灵,陈旻,等.基于虚拟储能的综合能源系统分布式电源功率波动平抑策略 [J]. 发电技术,2020,41(1):30-40.
- [15] 黄子桐,徐永海,叶兴杰.考虑有源配电网运行灵活性的智能储能软开关优化规划[J].电力工程技术,2023,42(1):143-153.
- [16] 汪宇航,李琰,应飞祥,等.计及可靠性成本的风光储微电网储能容量协同优化 [J]. 电测与仪表,2023,60(5):59-65.

Frequency support technology of doubly-fed machine phase modulation system with fly-wheel energy storage based on virtual synchronization and speed limit

Kou Jian¹, Liu Hongyong¹, Yu Weiyao², Dai Jiageng¹, Yao Fang²

(1.State Grid Jibei Zhangjiakou Wind and Solar Energy Storage and Transportation New Energy Co.,Ltd., Zhangjiakou 075000, China; 2.School of Electrical Engineering, State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: When the doubly-fed machine is connected to the grid, it can support or raise the frequency of the grid by compensating the active power, but the rotor speed decreases quickly and is not controllable, the time of active power compensation and frequency support is limited, and the stability of motor can not be guaranteed. This paper presents a frequency support technique for doubly-fed machine (DFIG) phase modulation system with flywheel energy storage based on virtual synchronization control and dynamic speed limit. Firstly, the flywheel is hung on the rotor shaft of the doubly fed machine to increase the inertia of the system, and the mechanical energy storage, and delay the rotor speed decline rate in the process of frequency drop. Secondly, when the frequency of power grid drops, the real-time compensation of active power is carried out by means of virtual synchronization control strategy, and the compensation time of active power is regulated on demand based on the dynamic control of the lower speed limit of rotor. Finally, the validity of the proposed frequency support technology is verified by Matlab/Simulink simulating.

Keywords: doubly fed electric machine; frequency drops; active compensation; flywheel energy storage; virtual synchronization