

双馈电机变速调相系统低电压穿越过程的转子稳定性控制研究

何聚彬¹, 赵博超¹, 于维耀², 张镇浩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 省部级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: 双馈风机运行于电动模式下,对电网具有一定的惯量支撑能力,但支撑能力有限,且电网低电压穿越过程中转子存在失控问题。对此,文章提出了一种在电网电压跌落时转子的稳定性控制技术。首先,在双馈风机转子转轴上外挂飞轮,增大系统惯量,稳定转速;其次,在电网电压跌落时进行电压补偿、削弱转子侧反电动势,稳定转子电流;最后,在 MATLAB/Simulink 平台中搭建了系统仿真模型进行仿真验证。结果表明,采用转子稳定性控制技术的双馈风机,转子转速抗突变能力提高了 20%,转子电流跌落值减少了 45%,验证了所提转子稳定性控制技术的有效性和可靠性。

关键词: 双馈风机; 低电压穿越; 转子转速; 转子电流

中图分类号: TK81; TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)07-0979-07

0 引言

发展新能源为主体的新型电力系统,必须提高新能源微网的一次调压调频能力,在电网故障时起到频率和电压支撑作用。目前,陆上风机单台容量高达 3 MW,电网故障、特别是电压跌落时风机应能不脱网运行,避免切机功率缺额所致的大规模停电^[1,2]。因此,可以让外挂飞轮的风机运行在电动模式,转子动能和支撑能力因无风速限制得以提升,但由于转子机械和电气应力的局限性,应解决转速和电流的稳定性控制难题^[3]。

双馈电机 (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) 外挂飞轮,可提高惯量支撑能力。文献[4,5]搭建了飞轮储能微网的数学模型,在风机不同故障的情况下进行对比研究,结果表明,飞轮的使用缓解了故障时的无功波动,保证了电网供电可靠性。文献[6]设计了转速外环使用模糊 PID 控制的飞轮装置双闭环控制系统,搭建了飞轮储能装置的仿真模型,采用自然风速模型对其进行验证,结果表明,该飞轮控制方案对电网波动具有很好的抑制作用。文献[7]制定了 DFIG 参与系统调频的方案,同样进行了仿真试验,结果表明,飞轮系统可以有效平滑 DFIG 的功率波动,减小电机调频压力。文献[8]建立了一套含飞轮储能系统的风电

场能量管理体系,仿真结果表明,飞轮装置的加入有效抑制了功率的波动。上述飞轮储能电机可在一定程度上应对风能不确定性、机组故障、电网故障等问题^[9],但受风速限制,转子转速和电流调控范围有限。

电网故障、特别是电压大幅跌落时,外挂飞轮的 DFIG 易发生转子电流过冲及随后的过电压等问题,应尽可能抑制转子电流的暂态分量和负序分量,改进适应各种故障的 DFIG 控制策略。文献[10,11]根据 DFIG 的数学模型,推导出电网电压对称、不对称跌落时,风机定子磁链以及转子电压的暂态响应,研究表明,电网电压跌落时尤其是不对称跌落时转子电压幅值很高,严重危害到 DFIG 的安全运行。文献[12]提出的比例电流跟踪控制能够达到限流稳压的目的,但在故障期间无法抑制转矩振荡,在严重的情况下可能导致转子转速过高,损毁风机。文献[13]提出了主动阻尼控制策略,通过增加系统阻尼抑制转子电流与转矩的波动,提高双馈电机的故障穿越能力,但当电网发生严重故障时可能无法提供足够的阻尼。文献[14]通过鲁棒控制器能够提高转子侧变流器电压输出容量的利用率,但在电网发生严重故障时,控制系统容易饱和,无法及时输出控制指令,可能导致系

收稿日期: 2022-10-20。

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

统失控运行。上述成果是针对发电运行模式的DFIG进行的稳定性控制。

目前,针对电动运行模式的飞轮储能DFIG的研究成果匮乏。电网电压跌落,会引起定子铁芯旋转磁场减弱,转子绕组感应电流减小,将使转矩降低,严重时电动机可能起动困难或不能起动。电机转速因转矩减小而变慢,使转子绕组切割磁力线的速度加快而增加感应电流,使得绕组温度升高,甚至导致电动机过热或烧毁。本文设计了一种电动状态下运行的飞轮储能DFIG在电网低电压穿越状况下的自我保护策略,以转子参数始终可控为关键点,通过转子外挂飞轮与速度闭环的控制抑制转子转速的波动,通过转子电压补偿策略抑制转子电流的波动,以此提高DFIG在电网故障时的自我保护能力。

1 双馈电机异步调相过程及其稳定性分析

DFIG是一种绕线式异步发电机,定转子绕组星接,定子绕组直接电网,转子绕组由集电环、电刷引出,通过AC-DC-AC变流器与定子三相绕组相连,如图1所示。

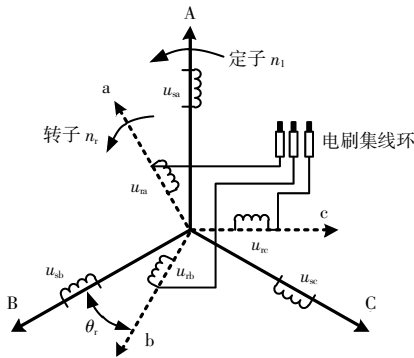


图1 双馈电机定转子绕组
Fig.1 Stator and rotor windings of DFIG

电网发生故障时,DFIG异步调相通过变换器控制励磁电流的幅值和频率,调控电流以补偿暂态无功,调控转速以抑制频率变化。而转速和电流的控制依赖于电、磁、动力学耦合关系,涉及电压、磁链、转矩及运动方程。

静止坐标系下电压方程与磁链方程为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_s \\ \mathbf{u}_r = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_r - j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \\ \boldsymbol{\psi}_r = L_r \mathbf{i}_r + L_m \mathbf{i}_s \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可得:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + L_s \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s + L_m \frac{d}{dt} \mathbf{i}_r \\ \mathbf{u}_r = R_r \mathbf{i}_r + L_m \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s + L_r \frac{d}{dt} \mathbf{i}_r - j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r$ 分别为定子、转子电压矢量; $\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r$ 分别为定子、转子电流矢量; $\boldsymbol{\psi}_s, \boldsymbol{\psi}_r$ 分别为定子、转子磁链矢量; 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 为转子转速。

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{P_m}{\Omega_r} = n_p \frac{P_m}{\omega_r} \quad (4)$$

式中: 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 为转子机械角速度, $\Omega_r = \omega_r / n_p$ 。

忽略转轴摩擦,运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

式中: T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转子惯量。

由式(4)和式(5)推导得:

$$n_p \frac{P_m}{\omega_r} - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (6)$$

DFIG调相旨在电网故障时释放转子动能以支撑电网频率稳定。规定时间内释放的动能越大,支撑效果越好。转子动能为

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_r^2 \quad (7)$$

式中: E_k 为转子动能。

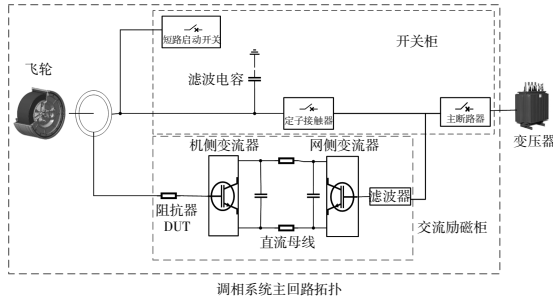
当电网电压发生跌落后,转矩失衡,电磁功率骤降,为支撑电网频率,须迅速释放转子动能,转速在式(6)约束下振荡衰减。同时,定子磁链出现较大暂态分量,转子的高速旋转导致转差率的增大,进而产生转子电压电流增量,严重时损坏转子励磁变流器。因此,须对转速和电流进行稳定性控制,确保转速控制在转子可以承受的应力范围以及电流暂态冲击不超过变流器的限制。

2 基于飞轮储能的双馈电动机转子稳定性控制策略

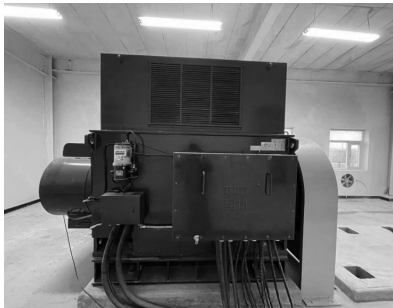
2.1 基于飞轮储能的双馈电动机异步调相方案

由式(7)可见,向电网释放相同动能前提下,

增大惯量 J 可起到增大转子动能、提高支撑效果和降低转速超调量的作用。本文提出一种基于飞轮储能的 DFIG 并网运行的异步调相技术, 系统结构如图 2 所示。



(a) 调相系统拓扑



(b) 调相系统实物



(c) 变流器实物

图 2 基于飞轮储能的双馈电机异步调相系统

Fig.2 Asynchronous phase modulation system DFIG based on flywheel energy storage

图 2 中:DFIG 转子转轴直接外挂飞轮, 飞轮与转子同轴同转速,影响转速的动态特性,可起到提高系统惯量与储能的作用; 全功率变流器在励磁和变流策略下从机侧经电阻器 DUT 向转子供电,调节励磁电流,支撑电压和频率;启动开关、定子接触器和主断路器配合调相系统的启停。

外挂飞轮转子后,电机惯量 H 的方程为

$$H=(J_1+J_2) \frac{(2\pi f_n/n_p)^2}{2S_n} \quad (8)$$

式中: J_1 为转子惯量; J_2 为飞轮惯量; S_n 为系统额

定容量; f_n 为额定频率; n_p 为转子极对数。

由式(8)可见,外挂飞轮后电机惯量 H 增大,通过同步旋转坐标系下电机转子运动方程影响转子转速。

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{2H} (T_e - T_L) \quad (9)$$

电机惯量 H 对转子的运行特性有直接影响, H 越大,转子转速的变化率越小。因此,外挂飞轮后 H 增大可以抑制转子转速的变化速率。

2.2 基于转速 PID 和反电动势暂态补偿的转子电流稳定性控制策略

本文提出基于转速 PID 和反电动势补偿的转子电流稳定性控制策略,其基本思想如下:计算反电动势的暂态分量,将其负值补偿到转子电压观测值,得到转子电压目标值,经 PWM 产生开关矩阵驱动转子侧变流器,产生无暂态反电动势分量的目标转子电压,从根本上消除电流突变成因,如图 3 所示。

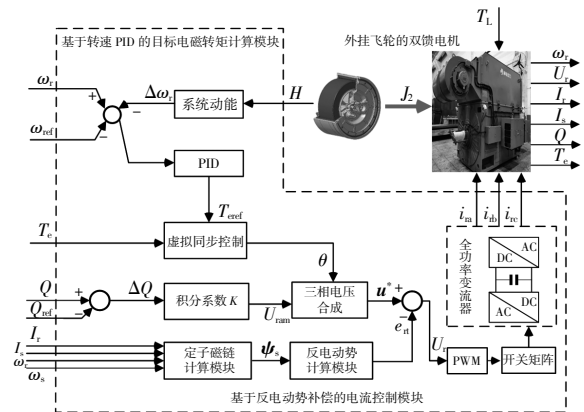


图 3 飞轮储能异步调相系统的转子电流稳定性控制策略

Fig.3 Rotor current stability control strategy for flywheel energy storage asynchronous phase modulation system

① 转子电压矢量的计算

以 $\omega_r - \omega_{ref} = 0$ 为目标对转速进行 PID 控制,结合式(4)可得目标电磁转矩参考值 T_{ref} 为

$$T_{ref} = P_n \cdot \frac{k_p(\omega_r - \omega_{ref}) + k_i \int_0^t (\omega_r - \omega_{ref})}{2\pi f_n} \quad (10)$$

通过虚拟同步控制可计算出转子电压相位,虚拟同步控制方程为

$$\begin{cases} D_1 \frac{d\omega}{dt} = T_{ref} - T_e - D_2(\omega - \omega_{ref}) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_r \end{cases} \quad (11)$$

式中： ω 为虚拟同步转速； D_1 为虚拟惯量常数； D_2 为虚拟阻尼常数； θ 为转子电压相位； k_p 为比例系数； k_i 为积分系数； P_n 为额定功率。

通过无功环节可计算出转子电压幅值，转子电压幅值 U_{rnm} 的计算式为

$$U_{\text{rnm}} = (Q - Q_{\text{ref}})K \quad (12)$$

式中： Q 为无功测量值； Q_{ref} 为无功目标参考值； K 为积分系数。

由式(11)与式(12)得到 U_{rnm} 与 θ 后，可得转子电压矢量 \mathbf{u}^* 为

$$\mathbf{u}^* = \begin{cases} u_a^* = U_{\text{rnm}} \sin(\theta) \\ u_b^* = U_{\text{rnm}} \sin(\theta - 2\pi/3) \\ u_c^* = U_{\text{rnm}} \sin(\theta - 4\pi/3) \end{cases} \quad (13)$$

② 转子侧反电势暂态分量的计算

电网电压跌落使得定子绕组侧产生暂态磁链。

$$\psi_s = \psi_{\text{sw}} + \psi_{\text{st}} = \frac{\lambda u_{s0}}{j\omega_s} + \frac{(1-\lambda)u_{s0}}{j\omega_s} e^{-\frac{t}{\tau_s}} e^{-j\omega_s t} \quad (14)$$

式中： ψ_{sw} 、 ψ_{st} 分别为定子磁链的稳态值、暂态值； u_{s0} 为定子电压初值； λ 为定子侧电压变化系数； τ_s 为定子暂态磁链衰减的时间常数。

电网对称故障的暂态过程中，定子磁链的暂态分量会在转子侧感应出相应的反电势 e_{rt} 。

$$e_{\text{rt}} = -\frac{L_m}{L_s} \left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r \right) \psi_{\text{st}} \quad (15)$$

由于 $\frac{1}{\tau_s} \ll \omega_r$ ，所以式(15)可简化为

$$e_{\text{rt}} = -\frac{L_m}{L_s} j\omega_r \psi_{\text{st}} \quad (16)$$

电网电压跌落时暂态反电势 e_{rt} 是导致转子电流突变的决定性因素。转子电流无法直接控制，可考虑通过对转子电压补偿 $-e_{\text{rt}}$ ，间接抑制转子电流突变。

③ 转子电压目标值的计算

由式(13)所得转子电压与式(16)所得转子电压补偿量相减，可得经补偿后的最终转子电压，即机侧变流器电压目标值为

$$U_r = \mathbf{u}^* - e_{\text{rt}} \quad (17)$$

3 仿真与结果分析

为了验证本文所提出的转子电流控制策略的有效性，在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了 DFIG

的电力系统仿真模型，模型的关键参数如表 1 所示。为了统一单位等级，减少多个不同单位等级之间计算对单位的折算次数，将系统设置为标么化系统。其中，以电网电压在 3 s 时刻跌落至电网电压额定值的 70% 来模拟电网电压跌落。

表 1 系统仿真关键参数

| Table 1 System simulation parameters p.u. | |
|---|-------------|
| 参数 | 数值 |
| 虚拟惯量常数 D_1 | 0.1 |
| 虚拟阻尼常数 D_2 | 0.2 |
| 积分系数 K | 1/100 π |
| 定子电感 L_s | 0.18 |
| 转子电感 L_r | 0.16 |
| 电压变化系数 λ | 0.7 |
| 时间常数 τ_s | 7.8 |
| 转子转速参考值 ω_{ref} | 0.9 |

所得电网电压波形与电磁转矩变化如图 4 所示。

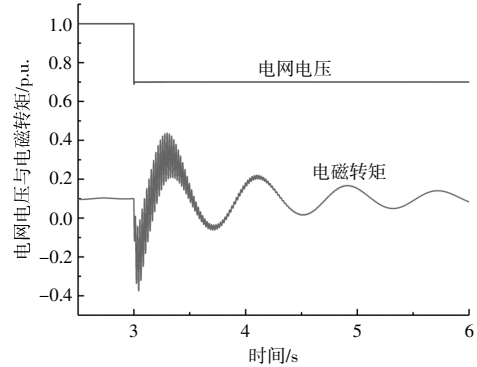
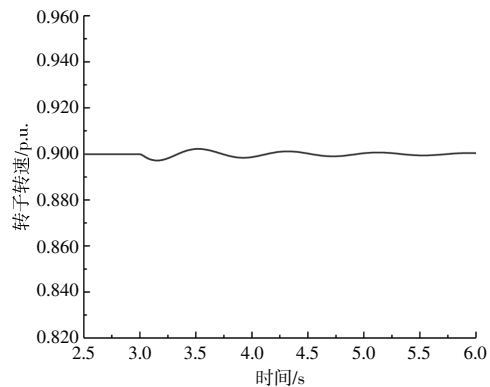


图 4 电网电压与电磁转矩跌落

Fig.4 Grid voltage and electromagnetic drop

由图 4 可见，电网电压跌落，电磁转矩发生同步与次同步振荡。

DFIG 低电压穿越过程中，有无外挂飞轮补偿的转子转速仿真结果如图 5 所示。



(a) 有飞轮有补偿

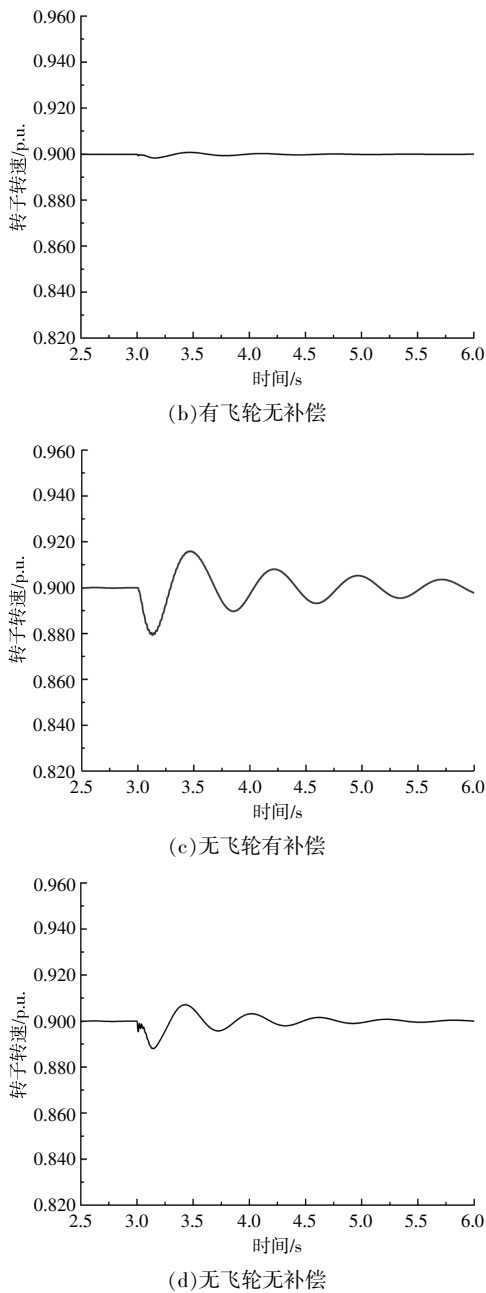


图5 转子转速变化
Fig.5 Rotor speed changes

由图 5 可见,DFIG 在低电压穿越过程中转子转速发生了较大波动。这是因为当电网发生故障时,由于 DFIG 端电压的降低以及无功优先的控制原则,DFIG 的电磁功率会出现较大程度的跌落,继而产生了转速的变化,转速的变化程度与电网跌落程度、负载情况及系统惯量大小有关。对比转速结果可知,添加了飞轮惯量支撑后,电网低电压穿越下的转子转速的变化更加平稳,转子转速跌落值由原先的 0.880 p.u. 左右提升到 0.898 p.u.

左右 (提升约 20%),且转速达到稳定的时间更短,可以更快地达到平衡状态。

在电网低电压穿越过程中,未附加策略与附加策略后的转子电流随电网电压跌落的突变情况如图 6 所示。

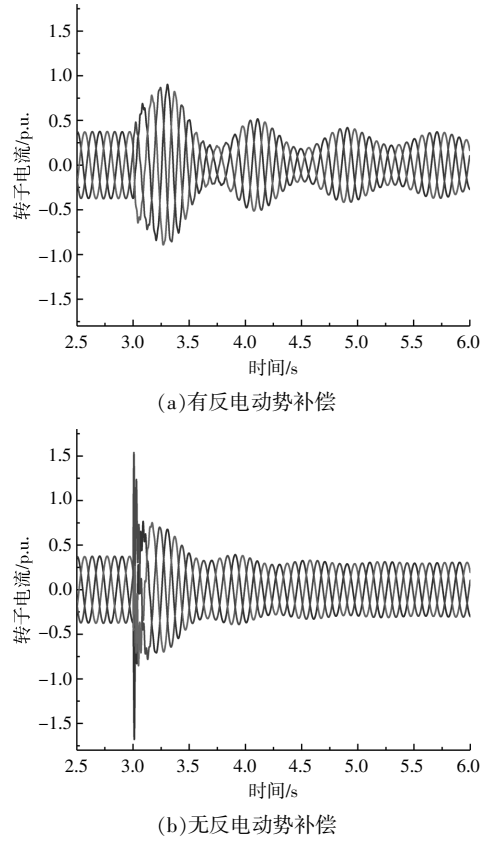


图 6 转子电流变化
Fig.6 Rotor current variation

由图 6 可见:在无电流稳定控制策略的情况下,转子电流在电压故障下的最大值可达到 1.6 p.u.左右,在此最大电流的冲击下,DFIG 系统中的背靠背变流器很可能被直接击穿;在基于反电动势暂态补偿的电流稳定性控制策略下,转子电流在电网低电压穿越故障过程中的瞬时突变值被大大降低,降低至约 0.9 p.u.(减小了约 45%),对转子电流变化率有明显的抑制效果;由有无转子电流控制策略的对比可知,在附加转子电流控制策略后,转子电流后续波动的平稳性不如前者,这是因为施加的反电动势补偿策略对系统的干扰。在本身电动状态下运行的 DFIG 所起到的作用主要是无功补偿和频率调节,在电网故障的情况下 DFIG 并不宜长时间工作,而是及时的进行自我保护来延长使用寿命,故该策略依旧具有一定的可

行性。

4 结论

本文设计了一种基于飞轮储能的 DFIG 低电压穿越过程的转子稳定性控制技术,通过转子侧外接飞轮提高系统惯量,与转速闭环配合,抑制了电压突降时转子转速曲线的波动,并使其可以更快地达到稳态;通过转子侧反电动势暂态分量的补偿,抑制转子电流的大幅波动。为验证电网低电压穿越过程中基于转速 PID 和反电动势暂态分量补偿的转子稳定性策略的有效性,搭建了 MATLAB/Simulink 系统仿真模型。仿真结果表明:

①转子转轴外挂飞轮,可在不改变支撑效果的前提下显著降低电网低电压穿越过程中 DFIG 的转子转速,起到控制转子机械稳定性的作用;

②基于转速 PID 和反电动势暂态分量补偿的转子稳定性策略作用下,转子转速的抗突变能力提升20%左右,转子电流跌落最大值减少了45%左右,机电稳定性效果显著。

参考文献:

- [1] 严干贵,贾希浩,王玉鹏,等.动态响应误差驱动的风机并网变流器控制参数辨识方法[J].东北电力大学学报,2023,43(3):1-7.
- [2] 黄永红,张敬芸,赵正晖,等.基于动态电压恢复器的低电压穿越控制技术[J].电测与仪表,2020,57(19):105-110.
- [3] 黄煜,袁宇浩,张广明.飞轮储能装置在风电场功率平滑控制中的策略优化[J].计算机测量与控制,2014,22(7):2093-2096.
- [4] 阮军鹏,张建成,汪娟华.飞轮储能系统改善并网风电场稳定性的研究[J].电力科学与工程,2008(3):5-8.
- [5] 苏猛,李凤霞.微电网中飞轮储能系统储能优化设计研究[J].计算机仿真,2018,35(11):94-97.
- [6] 张建华,王健,陈星莺,等.消除谐波电流的低电压穿越控制策略研究[J].哈尔滨理工大学学报,2012,17(1):20-25.
- [7] 张海.飞轮储能对永磁直驱风力发电系统并网特性的改善研究[D].上海:上海电力学院,2013.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 熊小伏,欧阳金鑫.电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J].中国电机工程学报,2012,32(28):114-121.
- [11] 杨淑英,孙灯悦,陈刘伟,等.基于解析法的电网故障时双馈风力发电机电磁暂态过程研究[J].电力系统自动化,2013,33(S1):13-20.
- [12] Huang Q,Zou X,Zhu D,et al.Scaled current tracking control for doubly fed induction generator to ride-through serious grid faults [J].IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(3):2150-2165.
- [13] Liang J,Qiao W,Harley R G.Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines [J].IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(3):836-843.
- [14] Hu S,Lin X,Kang Y,et al.An improved low-voltage ride through control strategy of doubly fed induction generator during grid faults [J].IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(11):3653-3665.

Research on rotor stability control during low-voltage traversal of doubly fed machine variable speed phase modulation system

He Jubin¹, Zhao Bochao¹, Yu Weiyao², Zhang Zhenhao¹, 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: The doubly fed induction generator, operating in electric mode, has a certain inertia supporting capacity to the power grid, but the supporting capacity is limited, and the rotor is out of control during the low-voltage crossing of the power grid. In this paper, a kind of rotor stability control technology is proposed when voltage sags in power system. Firstly, a flywheel is attached to the rotor shaft of a doubly fed fan to increase the inertia of the system and stabilize the speed of the rotor. Secondly, voltage compensation is used to reduce the back electromotive force of the rotor side and stabilize the rotor current when the voltage of the power grid falls, the simulation model of the system is built in MATLAB/Simulink platform, and the results show that the anti-mutation ability of the rotor speed of the doubly-fed fan is improved by 20% by adopting the rotor stability control technology, the rotor current drop value is reduced by 45%, which verifies the validity and reliability of the proposed rotor stability control technique.

Keywords: DFIG; low voltage ride through; rotor speed; rotor current