

SCCESS-DFIG 发电系统宽时间尺度功率波动的平抑控制方法

孙东阳, 孙立志, 吴凤江

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对高渗透率风电宽时间尺度功率波动平抑问题,提出了将变桨控制与超级电容储能功率控制相结合的功率波动抑制方法。利用超级电容对风电场有功功率波动进行双向快速、准确的调节,有效地控制了输出功率短时间尺度的波动;通过减载变桨控制留出功率裕度,当超级电容电压过低或过高时进行辅助功率调节,既优化了超级电容的能量管理,又实现了宽时间尺度的功率波动抑制。在通过建立含有双馈风力发电机(DFIG)、直流双向升/降压变换器、超级电容储能单元模型的基础上,对一个由 3 台具有超级电容储能的 DFIG(SCCESS-DFIG)组成的风电场进行仿真分析。通过在具有相同额定参数、不同风速曲线给定、不同的超级电容初始电压的运行状态下的模拟,验证所提控制策略的有效性。

关键词:双馈风力发电机;超级电容;风电功率波动;电压反馈;能量管理;变桨控制;协调控制

中图分类号:TM 614

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.016

0 引言

随着风电渗透率的不断提高,风电的功率波动将给电力系统的稳定运行带来挑战^[1-3]。由于风速具有宽时间尺度变化的特点,这必然会导致风电机组输出功率的大波动和高随机性。在规模化风电机组集中接入的电力系统中,风电机组输出功率变化的这些特点会直接影响到所连电力系统的弹性,从而对高渗透率风电并网下电力系统的稳定性及安全性产生威胁^[4]。

为了增强高渗透率风电接入电力系统的稳定性,国内外学者对于风电机组输出功率波动的平抑控制进行了研究并取得了一些成果。文献[5-10]利用储能系统作为功率滤波器对风电功率波动进行平抑控制;文献[11]通过增加由储能系统的能量状态和一阶滤波输出值组成的比例反馈环节,一定程度上解决了长时间运行过程中由于储能系统过充、过放导致的平抑控制失效问题,但类似上述文献绝大多数未对滤波后的风速曲线是否符合规则的要求进行比较说明。文献[12]提出风电机组功率波动经平抑控制后的指标应满足《风电场接入电力系统技术规定》^[13],同时结论中也指出风电场在秒级时间尺度下的功率波动概率及波动幅度都较大,导致配置的储能系统连续充放电频繁。文献[14]指出具有高比功率、循环寿命长的超级电容,更适合作为平抑短时间尺度风电功率波动的储能装置。文献[15-17]提出由超级电容和蓄电池组成的混合储能系统,以增加平抑风电功率波动的时间尺度,但其控制系统更为复杂,且在工程应用中通常选用的超级电容

及蓄电池总容量有限,仅依靠储能系统进行功率波动平抑存在一定难度。文献[18]提出采取变桨控制与储能技术相结合,但未提及具体的协调控制方法。文献[19]提出将超级电容储能装置与直流母线支撑电容经由 DC-DC 变流器相连接,通过双馈风力发电机(DFIG)网侧变流器对风力发电机单机输出功率进行平抑控制,但文献中未考虑风电场聚合效应以及平抑低频时间尺度功率波动的问题。

综上所述,利用储能装置在公共连接点(PCC)处进行功率波动平抑的研究较多,但受拓扑结构的限制,较难实现采用储能装置与风机自身控制相结合的方法进行功率波动平抑控制。本文针对直流母线具有超级电容储能的 DFIG(SCCESS-DFIG)发电系统,展开了输出功率波动平抑控制的研究。提出一种将超级电容储能与变桨控制相结合的风电输出功率波动平抑控制策略。该控制策略通过利用超级电容储能系统以及变桨控制协调工作,调节 SCCESS-DFIG 发电系统输出功率,使其满足并网规定要求;采用超级电容电压反馈,调节 SCCESS-DFIG 发电系统瞬时输出功率,使每台机组超级电容的电压值更趋近于合理电压范围;通过减载变桨控制,增加了 SCCESS-DFIG 发电系统功率波动平抑时间尺度;通过不同风速下 SCCESS-DFIG 发电系统的变流器功率分析,对超级电容瞬时吐纳功率进行限制,以防止网侧变流器功率饱和。本文利用 MATLAB/Simulink 搭建了由 3 台 SCCESS-DFIG 发电系统组成的小型风电场模型。通过在它们具有相同额定参数、不同风速曲线给定、不同的超级电容初始电压的运行状态下的模拟,验证提出的控制策略的有效性。

1 SCCESS-DFIG 发电系统

1.1 SCCESS-DFIG 发电系统的拓扑结构及变流器功率分析

SCCESS-DFIG 发电系统的拓扑结构如图 1 所示,

收稿日期:2017-08-20;修回日期:2018-06-09

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(E2016031)

Project supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province(E2016031)

其直接将储能单元输出端口通过 DC-DC 变流器连接至 DFIG 背靠背变流器中的直流母线上,构成了储能、发电一体化系统。这种拓扑便于采集单机配置超级电容电压作为储能与变桨协调控制的参考量;该拓扑通过共用网侧变流器(GSC)节省了成本,降低了储能系统变流器故障对于发电系统功率辅助调节能力的影响,不需要额外的占地面积,减少了所需线缆的费用,在经济性和安全可靠性方面具有优势。

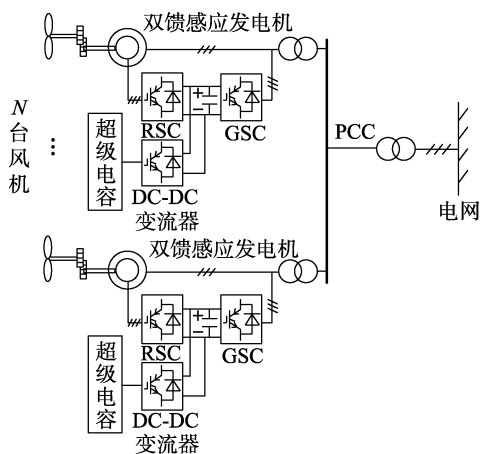


图 1 SCESS-DFIG 发电系统拓扑结构

Fig.1 Topological structure of SCESS-DFIG power generation system

SCESS-DFIG 发电系统中的功率关系如图 2 所示。在加入超级电容储能单元后,转子侧变流器(RSC)与网侧变流器可以不再保持功率平衡,此时的功率关系如式(1)所示。

$$P_{DFIG_SCg} - P_{DFIG_SCr} = P_{smo} \quad (1)$$

其中, P_{DFIG_SCr} 为 SCESS-DFIG 发电系统转子侧变流器流动功率; P_{DFIG_SCg} 为 SCESS-DFIG 发电系统网侧变流器流动功率; P_{smo} 为 SCESS-DFIG 发电系统超级电容平抑功率波动的瞬时吐纳功率。

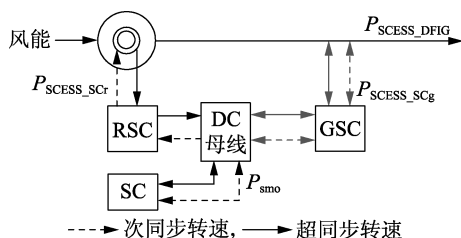


图 2 SCESS-DFIG 发电系统转子侧变流器功率关系

Fig.2 Power relationship of SCESS-DFIG power generation system rotor-side converter

SCESS-DFIG 发电系统瞬时输出功率 P_{SCESS_DFIG} 的范围为:

$$k_1 P_{DFIG} < P_{SCESS_DFIG} < k_2 P_{DFIG} \quad (2)$$

其中, $k_1 = 1 - |(\omega_s - \omega_{m_min})/\omega_s| + (\omega_s - \omega_m)/\omega_s$, $k_2 = 1 + |(\omega_s - \omega_m)/\omega_s| + (\omega_s - \omega_m)/\omega_s$, ω_s 为电网角速度, ω_m 为转子转动的电角速度, ω_{m_min} 为 SCESS-DFIG 发

电系统最低转速。

1.2 不同转速下 SCESS-DFIG 发电系统的输出功率

DFIG 与 SCESS-DFIG 发电系统输出功率、转子转速、桨距角随风速变化情况如图 3 所示,图中 P_N 为 DFIG 额定功率。不同风速下 DFIG 有功参考指令 P_{DFIG} 可由风力机转子转动的电角速度 ω_m 计算得到,如式(3)所示。

$$P_{DFIG} = \begin{cases} k_{opt} \omega_m^3 & \omega_1 \leq \omega_m < \omega_2 \\ \frac{P_{DFIG_max} - k_{opt} \omega_2^3}{\omega_{m_max} - \omega_2} (\omega_m - \omega_{m_max}) + P_{DFIG_max} & \omega_2 \leq \omega_m < \omega_3 \\ P_{DFIG_max} & \omega_3 \leq \omega_m \leq \omega_{m_max} \end{cases} \quad (3)$$

其中, k_{opt} 为最大功率跟踪曲线的比例系数; ω_1 为切入电角速度; ω_2 为进入转速恒定区时的电角速度; ω_3 为进入功率恒定区时的电角速度; ω_{m_max} 为 ω_m 的限幅值; P_{DFIG_max} 为 DFIG 输出有功功率的限幅值。

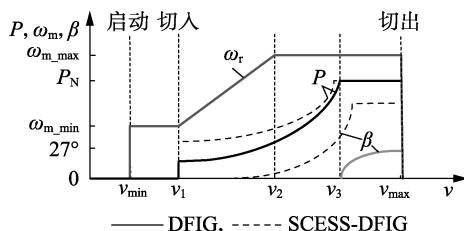


图 3 DFIG 与 SCESS-DFIG 发电系统运行状态图

Fig.3 Operating state diagram of DFIG and SCESS-DFIG power generation system

SCESS-DFIG 发电系统的瞬时输出功率如图 3 中 P 对应的虚线所示,由式(2)、(3)可得到风力发电机瞬时输出有功参考指令 $P_{SCESS_DFIG}^*$ 满足式(4)。

$$\begin{cases} k_1 k_{opt} \omega_m^3 < P_{SCESS_DFIG}^* < k_2 k_{opt} \omega_m^3 & \omega_1 \leq \omega_m < \omega_2 \\ k_1 \left[\frac{P_{DFIG_max} - k_{opt} \omega_2^3}{\omega_{m_max} - \omega_2} (\omega_m - \omega_{m_max}) + P_{DFIG_max} \right] < P_{SCESS_DFIG}^* < k_2 \left[\frac{P_{DFIG_max} - k_{opt} \omega_2^3}{\omega_{m_max} - \omega_2} (\omega_m - \omega_{m_max}) + P_{DFIG_max} \right] & \omega_2 \leq \omega_m < \omega_3 \\ P_{SCESS_DFIG}^* < P_{DFIG_max} & \omega_3 \leq \omega_m \leq \omega_{m_max} \end{cases} \quad (4)$$

从而得到 SCESS-DFIG 发电系统瞬时最大的补偿功率 P_{smo} 满足式(5)。

$$\begin{cases} (1 - k_1) k_{opt} \omega_m^3 < P_{smo} < (k_2 - 1) k_{opt} \omega_m^3 & \omega_1 \leq \omega_m < \omega_2 \\ (1 - k_1) \left[\frac{P_{DFIG_max} - k_{opt} \omega_2^3}{\omega_{m_max} - \omega_2} (\omega_m - \omega_{m_max}) + P_{DFIG_max} \right] < P_{smo} < (k_2 - 1) \left[\frac{P_{DFIG_max} - k_{opt} \omega_2^3}{\omega_{m_max} - \omega_2} (\omega_m - \omega_{m_max}) + P_{DFIG_max} \right] & \omega_2 \leq \omega_m < \omega_3 \\ P_{smo} < (k_2 - 1) \left[\frac{P_{DFIG_max} - k_{opt} \omega_2^3}{\omega_{m_max} - \omega_2} (\omega_m - \omega_{m_max}) + P_{DFIG_max} \right] & \omega_3 \leq \omega_m \leq \omega_{m_max} \end{cases} \quad (5)$$

2 SCESS-DFIG 发电系统输出功率波动平抑控制策略

2.1 SCESS-DFIG 发电系统的功率波动平抑规则及功率补偿范围

国家电网公司在《风电场接入电力系统技术规定》中指出,风电场应具备有功功率调节能力,同时允许风电场接入电力系统时有功功率在一定限值内变化,本文将允许功率波动的幅度设置为 ΔP ($\Delta P = \delta NP_N$, 其中 δ 为瞬时允许波动功率与 DFIG 额定功率之比),如表 1 所示。

表 1 风电场有功功率调节能力要求

Table 1 Requirement for active power regulation of wind farm

风电场装机容量/MW	1 min 有功功率变化最大限值/MW
小于 30	3
30~150	装机容量/10
大于 150	15

对于 1 min 尺度内,设定风电场 N 台风力发电机输出总功率的目标值 P_{total} 为:

$$P_{\text{total}} = \sum_{j=1}^N P_j(t_0) \quad (6)$$

此时风电场目标输出功率的标幺值 a_{obj} 为:

$$a_{\text{obj}} = \sum_{j=1}^N P_j(t_0) / (NP_N) \quad (7)$$

经过一个采样间隔 Δt 后,风电场输出总功率 P_{total_1} 为:

$$P_{\text{total}_1} = \sum_{j=1}^N P_j(t_0 + \Delta t) \quad (8)$$

实时风电场输出功率的标幺值 b_{real} 为:

$$b_{\text{real}} = \sum_{j=1}^N P_j(t_0 + \Delta t) / (NP_N) \quad (9)$$

由式(7)、(9)可知,储能系统平抑功率范围 $P_{\text{total_smo}}$ 为:

$$(-\delta + a_{\text{obj}} - b_{\text{real}})NP_N \leq P_{\text{total_smo}} \leq (\delta + a_{\text{obj}} - b_{\text{real}})NP_N \quad (10)$$

对于每一个 SCESS-DFIG 发电系统而言,其瞬时的补偿功率为:

$$(-\delta + a_{\text{obj}} - b_{\text{real}})P_N \leq P_{\text{smo}} \leq (\delta + a_{\text{obj}} - b_{\text{real}})P_N \quad (11)$$

2.2 计及超级电容容量利用率平滑功率控制策略

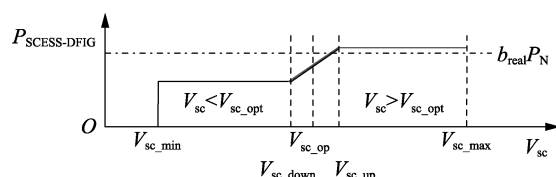
超级电容在容量设计时,不仅要考虑当风速降低时的功率补偿,也要考虑到风速突增时吸收功率的情况。因此,超级电容在一定的容量下,需要面对不同工况的功率平滑需求。通过式(12)可以确定优化目标电压值 $V_{\text{sc_opt}}$,使超级电容充放电容量空间裕度相同。系统运行过程中,期望通过调整补偿功率的方式,使得超级电容电压 V_{sc} 更趋近于 $V_{\text{sc_opt}}$ 。

$$\frac{1}{2}C_{\text{sc}}(V_{\text{sc_max}}^2 - V_{\text{sc_opt}}^2) = \frac{1}{2}C_{\text{sc}}(V_{\text{sc_opt}}^2 - V_{\text{sc_min}}^2) \quad (12)$$

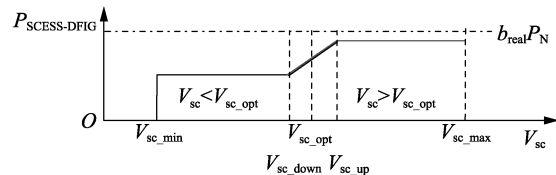
其中, C_{sc} 为超级电容容量。

不同风速工况下及实时状态下,SCCESS-DFIG 发电系统的运行转速不同,其超级电容的电压状态亦有所不同。如图 4(a)、(b) 及式(13)所示可以分别对瞬时功率是否超出表 1 规定进行讨论。

$$P_{\text{smo}} = \begin{cases} (\delta + a_{\text{obj}} - b_{\text{real}})P_N & V_{\text{sc_min}} \leq V_{\text{sc}} \leq V_{\text{sc_down}}; |a_{\text{obj}} - b_{\text{real}}| \leq \delta \\ 0 & V_{\text{sc_down}} < V_{\text{sc}} < V_{\text{sc_up}}; |a_{\text{obj}} - b_{\text{real}}| \leq \delta \\ (a_{\text{obj}} - b_{\text{real}})P_N & V_{\text{sc_down}} < V_{\text{sc}} < V_{\text{sc_up}}; |a_{\text{obj}} - b_{\text{real}}| > \delta \\ (a_{\text{obj}} - b_{\text{real}} - \delta)P_N & V_{\text{sc_up}} \leq V_{\text{sc}} \leq V_{\text{sc_max}}; |a_{\text{obj}} - b_{\text{real}}| \leq \delta \end{cases} \quad (13)$$



(a) SCESS-DFIG 输出功率波动在规则范围内



(b) SCESS-DFIG 输出功率波动在规则范围外

图 4 超级电容输出功率规则

Fig.4 Output power rule of super-capacitor

由式(13)及图 4(a)可知,如果 SCESS-DFIG 发电系统瞬时输出功率在规定范围内,当超级电容电压在 $[V_{\text{sc_down}}, V_{\text{sc_up}}]$ 之间时,可认为超级电容充放电容量适当,超级电容不进行功率调节。当超级电容的电压处于较低区域 $[V_{\text{sc_min}}, V_{\text{sc_down}})$ 时,SCCESS-DFIG 发电系统输出功率应趋近于 $(a_{\text{obj}} - \delta)P_N$;当超级电容电压处于较高区域 $(V_{\text{sc_up}}, V_{\text{sc_max}}]$ 时,DFIG 输出功率应趋近于 $(a_{\text{obj}} + \delta)P_N$,通过控制 SCESS-DFIG 发电系统的输出功率,在满足表 1 所示的功率输出范围规定的前提下使超级电容电压趋近于 $V_{\text{sc_opt}}$ 。由图 4(b)可知,如果 SCESS-DFIG 发电系统瞬时输出功率超出规定范围,超级电容需要吸收或补偿双馈发电机输出功率使其最终输出功率满足规定要求。当超级电容电压处于 $(V_{\text{sc_up}}, V_{\text{sc_max}}]$ 时,SCCESS-DFIG 输出功率为 $(a_{\text{obj}} + \delta)P_N$;当超级电容电压处于 $[V_{\text{sc_down}}, V_{\text{sc_up}}]$ 时,SCCESS-DFIG 输出功率瞬时输出为 $a_{\text{obj}}P_N$;当超级电容电压处于 $[V_{\text{sc_min}}, V_{\text{sc_down}})$ 时,SCCESS-DFIG 输出功率为 $(a_{\text{obj}} - \delta)P_N$ 。

2.3 基于变桨减载的 SCESS-DFIG 发电系统输出功率波动平抑控制策略

2.3.1 变桨距角的减载控制策略

对于超短时间尺度的功率波动,可以通过超级电容及直流变流器功率控制,平滑风机输出功率,以满足规定要求。但当功率长时间单趋势波动或风速大幅度变化时,超级电容需要与变桨系统通过协调控制,达到平滑输出功率的目的。

SCESS-DFIG 发电系统变桨系统的控制框图如图 5 所示。桨距角 β 与最大风能跟踪曲线比例系数 k_{opt} 及叶尖速比 λ 之间的数学关系为:

$$\begin{cases} k_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3} C_p \\ C_p = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{18.4\lambda_i} \\ \lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (14)$$

其中, ρ 为空气密度,取 1.1225 kg/m^3 ; R 为桨叶半径。

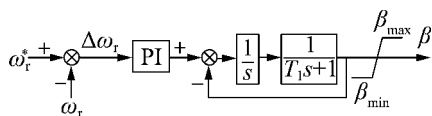


图 5 传统桨距角控制框图

Fig.5 Control block diagram of conventional pitch angle

在上述传统功率控制策略下,变速风电机组遵循最大功率跟踪控制指令向电网输送功率。当超级电容调节 SCESS-DFIG 发电系统功率使电压达到电压阈值时,SCESS-DFIG 发电系统无法提供额外的功率帮助超级电容电压恢复以及平抑输出功率波动。

本文通过减载控制,配置 SCESS-DFIG 发电系统桨距角裕度,提供额外的功率维持超级电容电压以及平抑波动功率。为得到风能利用系数 C_p 与桨距角 β 的直接关系,首先通过式(14)得到 C_p - λ - β 之间的关系,如图 6 所示。同时:

$$\partial C_p / \partial \lambda = 0 \quad (15)$$

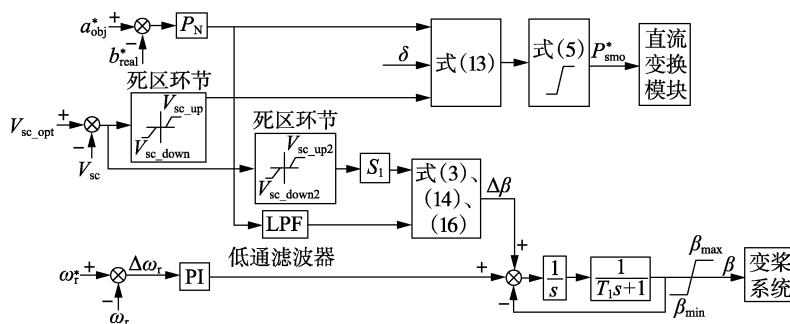


图 8 变桨及超级电容协调控制框图

Fig.8 Coordinated control block diagram of variable pitch and super-capacitor

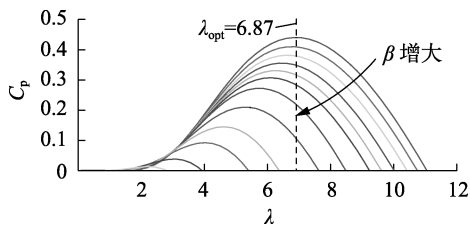


图 6 C_p - λ - β 特性曲线

Fig.6 Characteristic curves of C_p - λ - β

故可以求得最大风能利用系数的最优叶尖速比 $\lambda_{opt} = 6.87$,进而求得在 λ_{opt} 下不同桨距角所对应的风能利用系数 C_p 。通过数据拟合,得到 C_p - β 之间的线性关系如图 7 所示。通过拟合曲线的对比,将 C_p - β 拟合为二阶方程如式(16)所示,更贴近实际曲线。

$$C_p = -(0.02236\beta - 0.6284)^2 + 0.835 \quad (16)$$

若风机减载 10% 运行, $C_p = 0.44 \times (1 - 10\%) = 0.396$, β 应留有 1.528° 的余量。

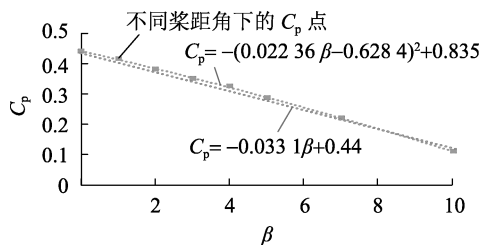


图 7 最优叶尖速比下风能利用系数 C_p 与桨距角 β 之间的拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of C_p and β under optimal tip speed ratio

2.3.2 变桨及超级电容协调控制策略

变桨及超级电容协调控制策略如图 8 所示,当超级电容电压在 $[V_{sc_min}, V_{sc_max}]$ 范围内时,根据风电场目标输出功率 a_{obj} 与实时输出功率 b_{real} 、允许瞬时功率波动容量比例 δ 以及瞬时超级电容电压 V_{sc} ,通过式(13)及变流器输出限制式(5)得到瞬时补偿功率 P_{smo} 。当超级电容电压低于 V_{sc_down2} 或者高于 V_{sc_up2} 时,设置 $S_1 = 1$ 启动变桨距角控制策略,通过变桨距角平抑功率。通过式(3)、(14)、(16)可以得

到桨距角所需调整的补偿角度 $\Delta\beta$, 作为桨距角控制的补偿量。变桨及超级电容协调控制平抑风电功率的流程图如附录 A 所示。

3 仿真分析

本文采用 MATLAB/Simulink 搭建了 SCCESS-DFIG 发电系统发电机、直流变换及超级电容仿真模型, 如附录 B 中图 B1 所示。为了验证本文协调控制策略的有效性, 仿真中选取 3 台具有相同额定电气参数的 SCCESS-DFIG 发电系统, 其电气参数如附录 B 中表 B1 所示, 以模拟风电场中不同位置的风力发电机。

每台机组采用基本风、阵风、渐变风和随机风叠加的风速模型作为不同的风速给定, 如附录 C 中图 C1 所示。可见, 1 号 SCCESS-DFIG 发电系统的风速曲线在 2 s 时有一个 3 m/s 的向下阶跃, 之后匀速恢复到起始风速; 2 号 SCCESS-DFIG 发电系统风速曲线呈上升趋势; 3 号 SCCESS-DFIG 发电系统风速曲线变化较为平稳。

仿真中设定风电场期望总输出功率为 2 MW, 风电场装机容量为 7.5 MW, 为了能够使该控制策略适用于更高容量的风电场, 按照《风电场接入电力系统技术规定》, 选择波动功率幅值为装机容量的 1/10 (即 0.75 MW), 因此设定风电场瞬时输出功率的下限为 1.25 MW、上限为 2.75 MW 时满足要求。

本文分别采用无功功率波动抑制策略(策略 1)、文献[16]波动功率抑制策略(策略 2)及本文控制策略(策略 3), 对风电场输出功率平滑效果进行了比较, 功率平抑前后风电场总输出功率对比如图 9 所示。可见, 当 DFIG 不具有超级电容平滑功率时, 风电场总输出功率最大达到 4.8 MW, 超过了输出功率上限 2.75 MW, 因此不能满足规则要求, 证明 3 台机组在给定风速工况下, 需要抑制功率波动才能符合规则要求; 当 SCCESS-DFIG 发电系统利用文献[16]控制策略时, 风电场总输出功率被限制在了 1.25~2.75 MW 之间, 符合《风电场接入电力系统技术规定》要求; 本文所提控制策略下, 当风电场风速大幅度变化时, 可以很好地平抑风电场功率, 具有比文献[16]更宽的平抑功率波动的时间尺度。

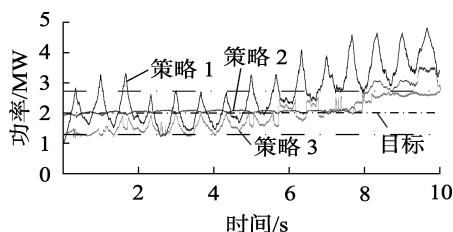


图9 功率平抑前后风电场总输出功率对比

Fig.9 Comparison of total output power of wind farm before and after smoothing

附录 C 中图 C2 为 SCCESS-DFIG 发电系统无储能功率波动平抑控制和采用文献[16]功率平滑控制策略以及采用本文所提控制策略下, 1 号、2 号、3 号单机输出功率对比曲线。

图 10 为本文控制策略下 SCCESS-DFIG 发电系统所配置的超级电容在平抑功率波动过程中的输出功率曲线。可见, 平滑输出功率时, 仿真初始阶段总输出功率平滑效果较好, 但当超级电容电压越限退出功率平滑后, 总输出功率超过了规则要求。附录 C 中图 C3 为 3 台 SCCESS-DFIG 发电系统桨距角变化曲线。可见, 由于 3 号 SCCESS-DFIG 发电系统所配置的超级电容在仿真起始阶段处于低电压范围, 因此变桨系统进行变桨控制此时桨距角为 0° ; 当其超级电容电压恢复至 300 V 进入次低电压区域时, 变桨系统恢复减载控制, 桨距角恢复至 1.58° 。

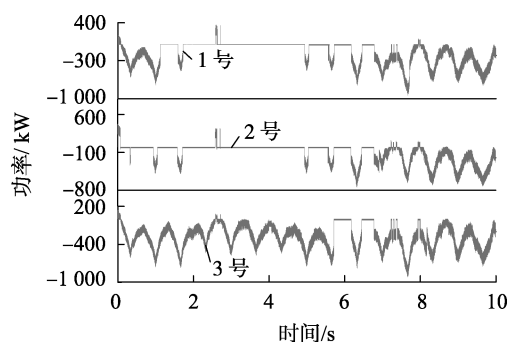
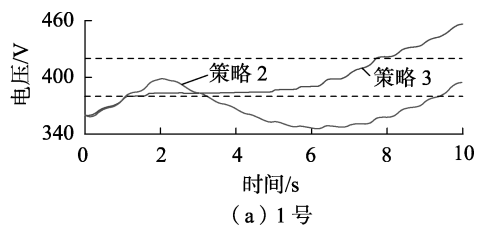


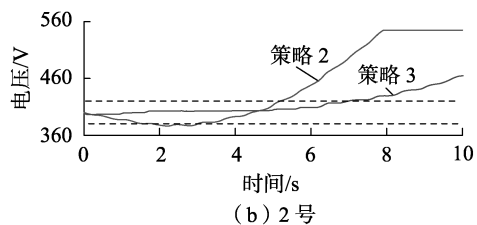
图10 超级电容输出功率对比

Fig.10 Comparison of output power among super-capacitors

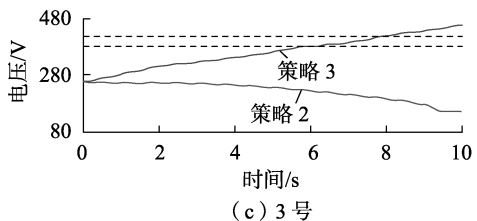
图 11 为当采用本文控制策略与文献[16]所提控制策略时, 超级电容在初始电压相同的条件下电



(a) 1号



(b) 2号



(c) 3号

图11 超级电容工作电压曲线

Fig.11 Operating voltage curves of super-capacitors

压曲线对比图。由图 10 及图 11 可知,由于起始阶段 1 号及 3 号超级电容电压处于次低电压状态,因此其吸收能量高于 2 号超级电容电压值,并达到 380 V(最优电压区间内)。2~4 s 期间,当风电场总输出功率在限定范围内时,1 号、2 号超级电容电压在最优电压区间,因此超级电容与电网不进行能量交换。相比之下,3 号超级电容此时处于次低电压区域,直流变流器调节吐纳功率,使超级电容电压趋向于最优电压区间,证明本文所提控制策略具有根据超级电容电压调节吐纳功率的功能。当 2 号超级电容电压超过 420 V 进入次高电压区间后,直流控制器根据超级电容电压调节平抑功率,其吸收能量低于 1 号机组储能系统(如图 10 所示)。仿真临近结束阶段,在无功率波动平抑控制下风电场输出功率超过了 2.75 MW(风电场输出功率上限),此时 3 台超级电容都处于次高电压区域,因此风电场平滑后输出功率临近规定范围允许上限。由图 11(a)可以看出,本文提出的控制策略与文献[16]控制策略相比,其电压曲线更趋近于最优电压范围,同时超级电容的电压波动幅度低于文献[16]所提控制策略下超级电容电压波动幅度。对比图 11(b)、(c)电压曲线可见,当初始电压相同时,文献[16]控制策略下电压更容易达到了电压限值,限制了功率波动平抑的时间尺度,而本文所提控制策略下超级电容的电压依然有较大的充放电裕度,证明本文控制策略在平抑风电场输出功率波动符合规范要求的基础上,优化了超级电容的能量利用率,使得风电机组具有了更宽的功率波动平抑尺度。

4 结论

本文采用 DFIG 转子侧变流器、DC-DC 变流器及超级电容储能单元构成的 SCESS-DFIG 发电系统拓扑结构,分析了该发电系统的功率关系,以《风电场接入电力系统技术规定》为标准,利用超级电容电压反馈作为调节参量,将 DFIG 单机配置超级电容功率控制与其变桨控制相结合,提出了一种新的适用于风电场的功率波动平抑策略。利用超级电容对于风电短时间尺度、大幅值的功率波动进行平抑,同时通过减载变桨距角控制,优化了超级电容的能量管理,增加了发电机组功率平抑控制的时间尺度。通过搭建由 3 台 SCESS-DFIG 发电系统组成的小型风电场仿真模型,将本文提出的控制策略与文献[16]的控制策略进行对比验证,仿真结果表明本文所提控制策略在满足风电场整体输出功率要求的基础上,能使得单机配置的超级电容电压曲线更趋近于合理电压范围,拓宽了功率波动平抑的时间尺度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 舒印彪,汤涌,孙华东. 电力系统安全稳定标准研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):1-9.
SHU Yinbiao, TANG Yong, SUN Huadong. Research on power system security and stability standards[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):1-9.
- [2] 牛林华,龚庆武,黄炳翔,等. 大规模风电并网下的风光火电力系统联合优化调度[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):52-58.
NIU Linhua, GONG Qingwu, HUANG Bingxiang, et al. Optimal dispatch of wind-gas-coal power generation system with large-scale wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):52-58.
- [3] 汪海蛟,江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(19):126-135.
WANG Haijiao, JIANG Quanyuan. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19):126-135.
- [4] 袁小明,程时杰,文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):14-18.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1):14-18.
- [5] 雷琨,欧阳曾恺,李征,等. 平抑风能波动的储能电池 SOC 与滤波协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):126-131.
LEI Ting, OUYANG Zengkai, LI Zheng, et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2015, 35(7):126-131.
- [6] 熊倩,廖勇,姚骏. 含飞轮储能单元的直驱永磁风力发电系统有功功率平滑控制[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):97-105.
XIONG Qian, LIAO Yong, YAO Jun. Active power smoothing control of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generation system with flywheel energy storage unit[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2013, 33(5):97-105.
- [7] 李霄,胡长生,刘昌金,等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):86-90.
LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin, et al. Modeling and controlling of SCES based wind farm power regulation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9):86-90.
- [8] 谷青发,王杰. 基于非线性互补牛顿算法的电池储能系统平滑策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):86-91.
GU Qingfa, WANG Jie. Smoothing strategy of battery energy storage system based on nonlinear complementary Newton method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):86-91.
- [9] 杨锡运,任杰,李相俊,等. 结合序列分布概率的储能系统典型功率曲线提取方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):8-14,28.
YANG Xiyun, REN Jie, LI Xiangjun, et al. Typical power curve mining of energy storage system combined with sequence distribution probability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):8-14,28.
- [10] 刘世林,文劲宇,高文根,等. 基于飞轮储能的并网风电功率综合调控策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):34-39.
LIU Shilin, WEN Jinyu, GAO Wengen, et al. FESS-based comprehensive control of grid-connecting wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12):34-39.

- [11] YOSHIMOTO K, NANAHA T, KOSHIMIZU G. New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery energy storage system[C]// IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, USA; IEEE, 2006: 1244-1251.
- [12] 刘春燕, 晁勤, 魏丽丽. 基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平抑波动[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 35-39.
- LIU Chunyan, CHAO Qin, WEI Lili. Wind-storage coupling based on actual data and fuzzy control in multiple time scales for real-time rolling smoothing of fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 35-39.
- [13] 国家电网公司. 风电场接入电力系统技术规定: Q/GDW 392—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [14] 赵瑜, 周玮, 于芃, 等. 风电有功波动功率调节控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 85-91.
- ZHAO Yu, ZHOU Wei, YU Peng, et al. Study on regulation and control of active wind power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 85-91.
- [15] 于芃, 周玮, 孙辉, 等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 127-133.
- YU Peng, ZHOU Wei, SUN Hui, et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 127-133.
- [16] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- ZHANG Guojun, TANG Xisheng, QI Zhiping. Design of a hybrid energy storage system on leveling off fluctuating power outputs of intermittent sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 24-28.
- [17] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等. 基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 70-75.
- LI Fengbing, XIE Kaigui, ZHANG Xuesong, et al. The control strategy design for hybrid energy storage system based on charge/discharge status of lithium-ion battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 70-75.
- [18] 范立新, 郭浩, 顾文, 等. 基于储能与桨距角协调控制的风电功率波动平抑方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 100-105.
- FAN Lixin, GUO Hao, GU Wen, et al. Wind power fluctuation suppression based on control coordination between energy storage and pitch angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 100-105.
- [19] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 集成嵌入式储能的双馈风力发电系统功率控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 80-84.
- JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong. Power control of DFIG based wind power system incorporated with embedded energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 80-84.

作者简介:



孙东阳

孙东阳(1988—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要研究方向为新能源并网发电与超级电容储能技术(E-mail: ggdx@163.com);

孙立志(1970—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要研究方向为永磁电机及控制、特种电机及能量变换和新能源发电

技术;

吴凤江(1980—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,主要方向为可再生能源发电及先进电能变换技术。

Smoothing control method of wide time scale power fluctuation for SCSS-DFIG power generation system

SUN Dongyang, SUN Lizhi, WU Fengjiang

(School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to smooth the power fluctuation caused by high penetrations of wind power in a wide time scale, an approach combining the variable pitch control with super-capacitor energy storage power control is proposed. The super-capacitor is employed to enable bidirectional regulation of the wind farm active power fluctuation in a rapid and accurate way, and consequently the short time scale fluctuation of the output power is effectively controlled. The power redundancy is obtained using the load reduction variable pitch control. The auxiliary power adjustment will be triggered when the super-capacitors' voltage violates the voltage limit, which can not only optimize the energy management of super-capacitors, but also achieve the wide time scale power fluctuation suppression. Based on the model establishment of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator), DC bidirectional up/down converter and super-capacitor energy storage unit, a wind farm composed of three SCSS-DFIGs (DFIGs with Super-Capacitor Energy Storage System) is simulated. Based on the simulation of the operating conditions with the same rated parameters, different wind speed curves, and different super-capacitor initial voltages, the validity of the proposed control strategy is verified.

Key words: DFIG; super-capacitor; wind power fluctuation; voltage feedback; energy management; variable pitch control; coordinated control

附录

附录 A

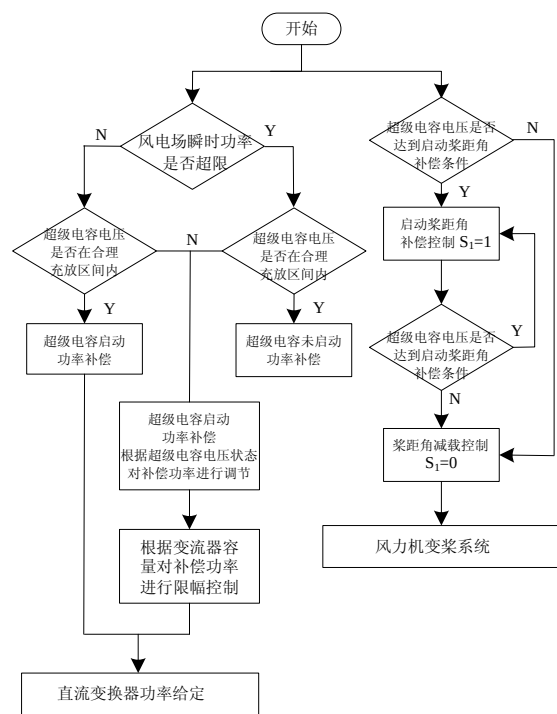


图 A1 变桨距角及超级电容协调控制平抑风电功率的工作流程

Fig.A1 Pitch and super capacitor coordinate control work flow to stabilize wind power

附录 B

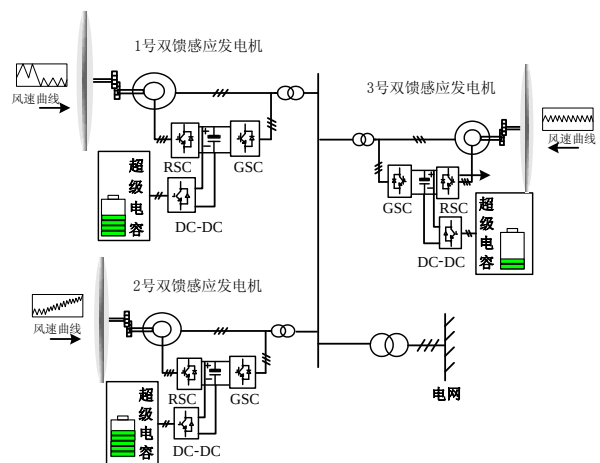


图 B1 仿真系统结构图

Fig.B1 Simulation system structure diagram

表 B1 SCESS-DFIG 电气参数

Table B1 SCESS-DFIG electrical parameters

名称	参数	名称	参数
发电机类型	DFIG	发电机容量	2.5MW
桨叶半径	42m	桨叶转速	10.8~18.9rpm/min
风电场目标 输出总功率	2MW	齿轮比例	1:100
最大风能利用 C_p	0.44	最优叶尖速比 λ_{opt}	6.87
超级电容 电压范围	150~545(V)	超级电容 容值	40F
[Vsc_down ,Vsc_up]	380~420 (V)	[Vsc_up, Vsc_up2]	420~480 (V)
[Vsc_up2, Vsc_max]	480~545 (V)	[Vsc_min, Vsc_down2]	150~300 (V)
-	[Vsc_down2, Vsc_down]	1 号超级电容 初始电压	360 (V)
2 号超级电容 初始电压	400 (V)	3 号超级电容 初始电压	255 (V)

附录 C

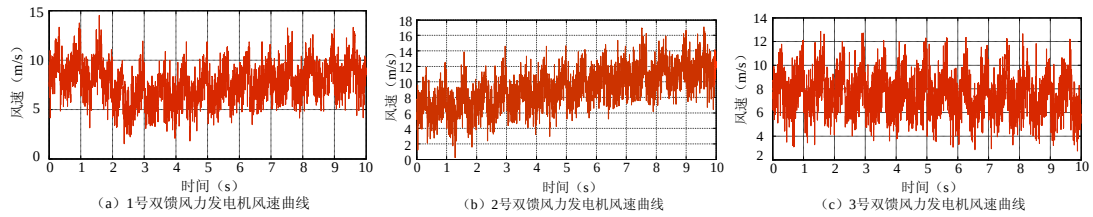
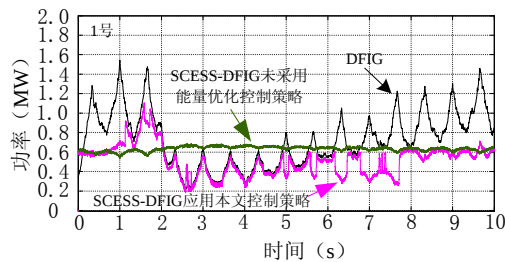


图 C1 DFIG 风速曲线

Fig.C1 Wind speed curves of DFIGs



(a) 1号双馈风力发电机输出功率曲线

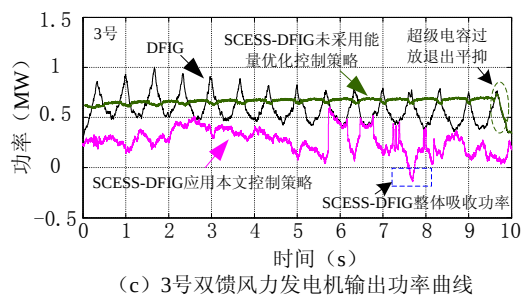
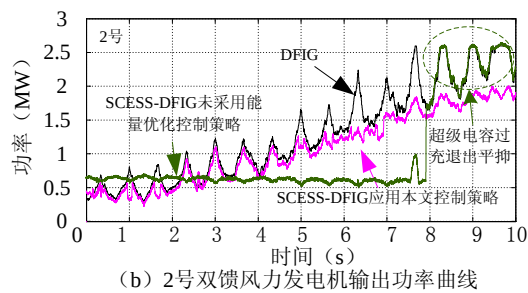


图 C2 1 号、2 号、3 号 DFIG 平抑控制前后输出功率对比

Fig.C2 Comparison of output power between 1, 2 and 3 DFIG before and after stabilization

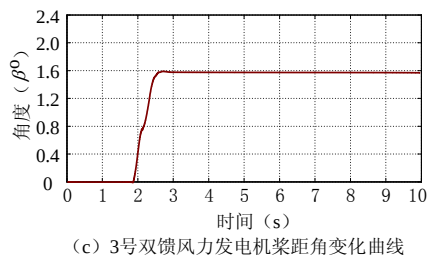
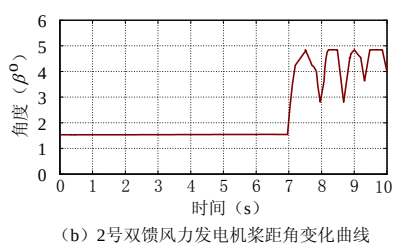
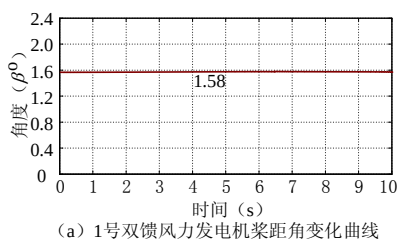


图 C3 1 号、2 号、3 号 SCESS-DFIG 桨距角变化曲线

Fig.C3 Curves of pitch angle of SCESS-DFIG 1, 2 and 3