第 49 卷 第 1 期：331-343 高电压技术 Vol.49, No.1: 331-343
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211079

基于超级电容储能的双馈风力发电机一次调节方法

颜湘武[1]，李锐博[1]，崔　森[1]，王德胜[1]，王雅婷[1]，李铁成[2]
（1. 河北省分布式储能和微网重点实验室(华北电力大学)，保定 071000;
2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院，石家庄 050021）

摘　要：随着风电穿透功率不断增大，系统对于风电出力的控制要求进一步提升，且对无功功率有着更为灵活的要求。双馈感应发电机(double-fed induction generator, DFIG)转速与电网频率解耦，难以在电网的频率、电压波动过程中提供快速、精准的支持。为增强单台双馈风电机组的并网致稳性，将超级电容器储能单元接入 DFIG 的直流母线处参与电网一次频率调节，针对储能需求讨论阵列配置。并通过增加网侧变流器(grid side converter, GSC)电压下垂控制，实现双馈感应发电机组一次调压功能，挖掘 DFIG 自身调节能力。通过搭建风电场−同步机系统模型，证明其对于系统稳定性的提高；最后通过 10 kW 双馈感应发电机实验平台，验证了所提控制策略的有效性与准确性。
关键词：超级电容储能；频率调节；电压调节；储能配置；稳定性

Primary Regulation Method of Grid-connected DFIG Based on Supercapacitor Energy Storage System

YAN Xiangwu[1], LI Ruibo[1], CUI Sen[1], WANG Desheng[1], WANG Yating[1], LI Tiecheng[2]
(1. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-Grid, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;
2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: With the increasing proportion of wind power generators, the control needs to be further enhanced. Besides, the grid has a more flexible reactive power requirement. The speed of the doubly-fed induction generator (DFIG) is decoupled from the grid frequency, which makes it difficult to provide fast and accurate support during the frequency and voltage fluctuations of the grid. To enhance the stability of the grid connection DFIGs, this subject connects the supercapacitor energy storage unit to the DC bus of the DFIG to participate in the primary frequency regulation of the grid and discusses. Discuss the array configuration according to the energy storage requirements. Through the addition of grid side converter (GSC) voltage droop control, the doubly-fed induction generator set has a primary voltage regulation function. Through the establishment of the wind farm-synchronous machine system model, it is proved that it can improve the stability of the system; finally, the effectiveness and accuracy of the proposed control strategy are verified through the 10 kW doubly-fed induction generator experimental platform.
Key words: super capacitor energy storage; frequency regulation; voltage regulator; energy storage configuration; stability

0　引言

随着风能发电成为主流电源形式之一，DFIG 作为一种成熟的风力发电结构，其装机容量不断提高。截至 2020 年底，风电装机容量占全国装机总容量的 13.3% [1]。探究并提高 DFIG 并网性能，成为目前研究的重点之一。

传统的控制模式下，由于交流励磁的作用，DFIG 以异步化转速运行，其转速与电网频率完全解耦。因此在频率变化的过程中不具有同步机的频率下垂及转动惯量特性，无法在电网频率的跌落与恢复全过程中起到支撑作用；同时，其不存在同步发电机的电压下垂特性。按单位功率因数运行时，风电场配套有多组电容器作为无功补偿。在电网电压波动情况下，其无功响应的灵活性、准确性较低。

目前，关于友好并网 DFIG 控制策略，国内外学者已经做出较多研究。有功−频率响应方面，文献[2-4]集中研究了减载控制的频率响应策略，并结合变桨系统给出了全风速段下的输出功率曲线，其在正常运行时 DFIG 保留一定功率备用参与调频，

基金资助项目：国家电网公司科技项目(SGHEDK00DYJS1900061)
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (SGHEDK00DYJS1900061).

但此类方法下 DFIG 输入机械能并未最大效率转化为电能，造成了能量的浪费，且变桨系统响应时间较长，存在机械磨损。文献[5-6]讨论了“限风”状态下一次调频的策略，其实质仍为减载控制的有功策略，未能在全时段实现一次调频。以上研究均未考虑 DFIG 自身发电效益，降低了风能利用率，文献[7-9]在保证效率下，引入虚拟惯量控制，但其调频时长较短，并在风机转速恢复时存在频率二次跌落问题，高风速区存在过载风险。已知集中式储能装置已广泛应用于风电场，文献[10]讨论了储能参与一次调频出力策略，未结合 DFIG 深入分析。文献[11]论述了风电场集中储能承担一次调频的方案，文献[12-13]提出 DFIG 风电机组和集中储能系统的协调频率控制策略，其依赖风电场与储能系统的通信。且风电场集中式储能方案，其安全可靠性风险往往大于分布式模式[14-15]。文献[16-17]提出基于单机改造的调频模式，同时由于电池储能功率密度低，循环周期寿命短[18-19]，故采用超级电容器储能装置参与电网一次调频，但仅停留于仿真研究，并无进行试验验证，且机组并无考虑网侧变流器中一次调压方面的研究，工程实用性有待考证。

文献[20]通过研究电网侧发生电压跌落或者上升,利用晶闸管控制的静止无功补偿器 (static var compensator, SVC)提出含柔性直流输电海上风电场集群的协同无功控制策略，文献[21]分析了静止同步补偿器(STATCOM)常见控制特性，通过仿真验证了采用 STATCOM 补偿风电传输所需的无功功率的可行性。文献[22-23]也提出了集中式风电场并网点处配置相应无功补偿装置来满足系统要求，但以上方案无法适应分散式风电机组随机、灵活的分布特点，响应速度较慢，额外配置的无功补偿装置增加了经济成本，故挖掘双馈风力发电机组本体无功调节能力并对其试验验证具有重要意义。

本文在外加储能平抑频率波动的思想上，注意到 DFIG 网侧变流器的无功补偿和有功传输能力，将超级电容器储能单元并联于 DFIG 变流器间的直流母线上，以 GSC 为通道，提出了一种超级电容器储能通过 GSC 协同控制为电网提供频率和电压支撑的方法，实现 DFIG 并网友好性的提高。借助超级电容器具有快速响应的特性，可以将储能侧的容量控制在较低水平，且利用了 GSC 的备用容量，在较低成本下实现了 DFIG 的一次调节。本文对控制策略进行了详细的探究和分析。并基于算例系统及 10 kW 双馈风力发电实验平台，对本文研究工作进行了验证。仿真及实验结果表明，在该方式下，当电网出现频率或电压偏差时，系统能够快速响应并为其恢复正常状态提供支持，未影响 DFIG 其本身的稳定运行，实现了并网可靠性和友好性的提高。

1 基于超级电容储能 DFIG 并网系统

1.1 引入超级电容储能的 DFIG 硬件结构

为了提高 DFIG 并网发电系统的稳定性，同时减少其渗透率不断提高的电网稳定性下降。本文从风机自身并网友好性考虑，提出将超级电容储能引入 DFIG 结构中，利用自有的 GSC 形成功率通道，无需修改转子侧变流器(rotor side converter, RSC)控制策略。这种方式降低了风电集群控制难度，无需机组与机组、机组与储能、机组与无功补偿装置间的通信协调，不影响其转动部分运动，实现 DFIG 机组即插即用的友好接入，在简单的改动下，实现了有功频率下垂控制、虚拟惯量控制、无功电压下垂控制，增大其出力范围，提升了风力发电的鲁棒性。

引入超级电容储能单元的 DFIG 发电系统结构如图 1 所示。

图中，超级电容器组通过双向 DC-DC 变换器接于 DFIG 变流器间的直流母线处。其中 P_m 为原动机输入的机械功率； ω_r 为转子角速度；P_e、Q_e 为 DFIG 输出总有功功率、无功功率；P_s、Q_s、P_r、Q_r 分别为 DFIG 定子侧、转子侧的有功输出及无功输出；P_g、Q_g 分别为网侧变流器的有功功率和无功功率；直流侧电压为 U_{dc}；超级电容器输出功率为 P_{sc}。正方向如图 1。其中 GSC 承担将直流侧有功功率逆变输出至交流电网和整流充电的功能，同时也对其进行无功功率输出控制，使 DFIG 在定子侧单位功率因数并网的同时有无功功率调节特性。

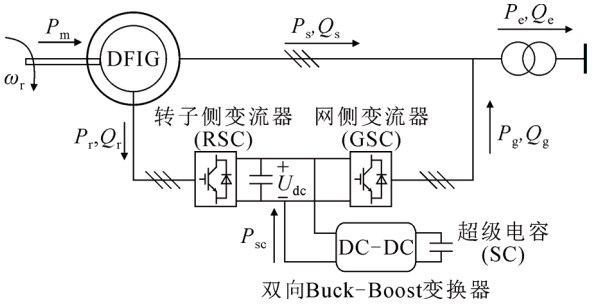


图 1 基于超级电容储能的 DFIG 发电系统

Fig.1 DFIG power generation system based on super capacitor energy storage

1.2　GSC 容量支持能力

忽略定子和转子回路中的电阻损耗，将 RSC、GSC、双向 DC-DC 变换器 3 者整合为一个节点分析 GSC 支路功率流向，得到

$$P_{\mathrm{g}} = P_{\mathrm{r}} + P_{\mathrm{sc}} \tag{1}$$

其中

$$P_{\mathrm{r}} = -sP_{\mathrm{s}} \tag{2}$$

s 为 DFIG 异步化运行的转差率。

DFIG 定子侧单位功率因数并网时，计及本文中提出 GSC 无功调节能力，忽略 GSC 变换损耗，得到本文提出一次调节方法下的 DFIG 功率流向如图 2 所示。

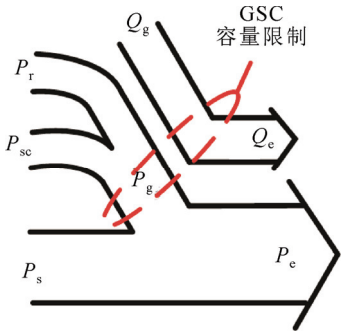


图 2　引入超级电容储能的 DFIG 功率流向图

Fig.2　DFIG power flow diagram with super capacitor energy storage

可以看出，本方法要求对 GSC 提出了更多的要求，GSC 容量可能存在瓶颈、限制一次调节能力，下面对其在运行时一次调节功率传输能力进行讨论。

当 DFIG 处于最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)运行模式下，为确定一次调节功率范围，将一次调节容量与转子角速度 ω_{r} 建立联系。MPPT 模式下，DFIG 输出最大总有功功率为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{m}} = k\omega_{\mathrm{r}}^{3} \\ k = \dfrac{1}{2}\rho S(R/\lambda_{\mathrm{opt}})^{3} C_{\mathrm{p\,max}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：k 为 MPPT 运行中间变量；ρ 为空气密度；S 为叶片扫过的面积；R 为叶片半径；λ_{opt} 为最佳叶尖速比；$C_{\mathrm{p}max}$ 为最大功率系数。

以 DFIG 电机处为节点，忽略损耗，其有功功率平衡，有

$$P_{\mathrm{m}} = P_{\mathrm{r}} + P_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

对于 DFIG，同步转速为 ω_0，其转差率为

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_{\mathrm{r}}}{\omega_0} \tag{5}$$

由(2)—(5)式，可得

$$P_{\mathrm{r}} = -k\omega_{\mathrm{r}}^{2}(\omega_0 - \omega_{\mathrm{r}}) \tag{6}$$

DFIG 变流器设计时，其取决于转子励磁功率，由式(2)，一般设计 GSC 容量为

$$S_{\mathrm{GSC}} = aP_{\mathrm{n}} \tag{7}$$

a 为 GSC 容量设计百分比，考虑到设备设计冗余，a 的取值略大于最大转差率 s_{max}，则在 GSC 容量限制下，一次调节功率 P_{sc}、Q_{g} 边界值满足

$$S_{\mathrm{GSC}} = \sqrt{(P_{\mathrm{r}} + P_{\mathrm{SC}})^{2} + Q_{\mathrm{g}}^{2}} \tag{8}$$

将式(6)代入，得调节功率边界

$$S_{\mathrm{GSC}} = \sqrt{((P_{\mathrm{SC}} - k\omega_{\mathrm{r}}^{2}(\omega_0 - \omega_{\mathrm{r}}))^{2} + Q_{\mathrm{g}}^{2}} \tag{9}$$

因为在 MPPT 运行下，转子功率 P_{r} 是和转子转速 ω_{r} 唯一相关的量，GSC 调节功率范围也仅取决于转子转速。以某型号 DFIG 网侧变流器[24]性能参数为例，其 GSC 设计百分比 a 为 0.28。将式(9)标幺化，k 取 0.578 7，则同步转速 ω_0 标幺值为 1，得到 GSC 一次调节范围如图 3 所示，图 3(a)、(b)分别为频率、电压波动时的调节范围。

如图 3(a)，当转子转速越快时，超级电容器的可用 GSC 充电备用功率越大；反过来，当转子转速越慢，拥有更多的放电备用功率。这样的有功互动是良性的，即当风速较低，风能提供有功支撑少时，超级电容经 GSC 释放功率能力较强，高风速时，则可由风能提供更多功率支撑，此时超级电容器亦能够以更大功率充电。由图 3(b)，无功调节范围受转速关系较小，在全转速下拥有 0.2(标幺值)以上的双向无功功率交换能力。此外，风机运行在额定最大功率区时恒转速运行，其功率关系与 1.2 (标幺值)转速下相同，以上分析是适用于全风速下的。

可以看出，在已有 GSC 硬件性能下，其备用容量可以在全风速下满足《风电机组虚拟同步机技术要求和试验方法》[25]中提到的“风电虚拟同步发电机若能调节有功输出参与电网一次调频，其有功出力可增加量的最大值至少为 10%P_{n}”，同时，无功调节能力也按 10%风机额定容量确定，有功及无功调节功率需求范围均标注在图 3 中，GSC 在全风速下满足一次调节需求。而且其在调频容量最小范围下，即转速 1.2 时留有至少 10%P_{sc} 的有功备用，在低风速区潜在更多释放有功功率的能力，高风速区存在超级电容快速充电能力可进一步探索。

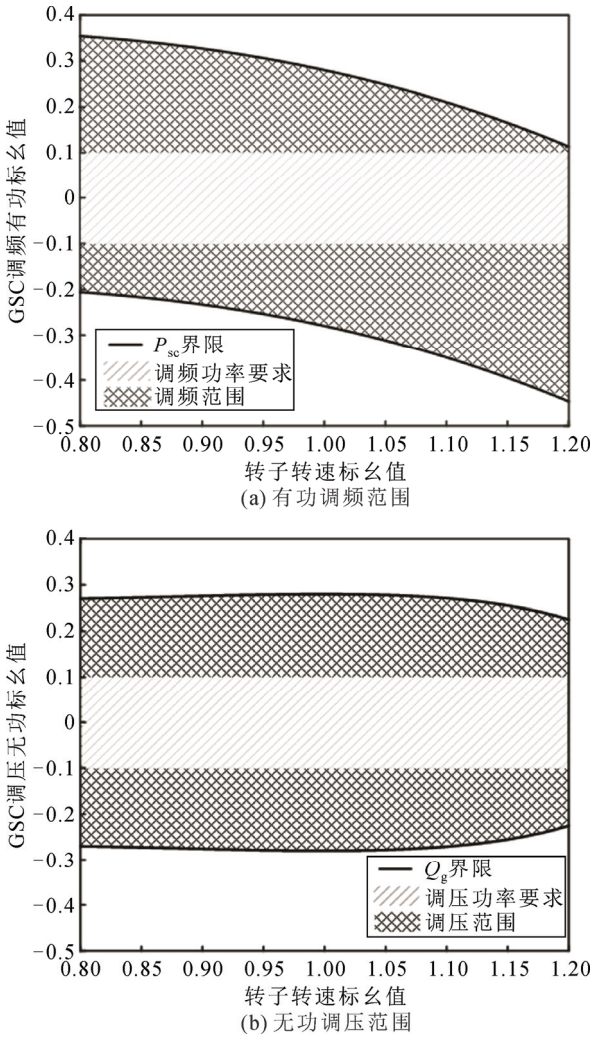


图 3 a=0.28 时全转速下一次调节功率范围

Fig.3 Primary modulation range at full wind speed when a=0.28

2 DFIG 超级电容储能有功控制

2.1 虚拟惯量控制

由于风轮质量远大于其所连接发电机转子的质量，所以较发电机转子，DFIG 的机械能输入结构中有巨大的动能可以挖掘，风力机转动部分具有的动能 E_k 为

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_r^2 \tag{10}$$

式中：J 是风轮与转子整体的转动惯量；ω_r 为任一运行转速。当转子转速 ω_r 变化时，其所释放的功率 P_E 即为动能 E_k 对时间的导数

$$P_E = \frac{\mathrm{d}E_k}{\mathrm{d}t} = J\omega_r \frac{\mathrm{d}\omega_r}{\mathrm{d}t} \tag{11}$$

对于电机，其时间常数 H 为额定转速 ω_0 动能比额定视在功率 S

$$H = \frac{J\omega_0^2}{2S} \tag{12}$$

将上式代入功率方程(11)，消去转动惯量 J，可得

$$\frac{P_E}{S} = 2H\left(\frac{\omega_r}{\omega_0}\right)\frac{\mathrm{d}\left(\omega_r/\omega_0\right)}{\mathrm{d}t} \tag{13}$$

将其值标幺化，并考虑到异步化运行时，其转速偏离额定转速较小，ω_r 约等于 ω_0，上式可简化为

$$P_E^* = 2H\frac{\mathrm{d}\omega_r^*}{\mathrm{d}t} \tag{14}$$

式中：P_E^* 为归算至额定功率下的动能释放；ω_r^* 为归算到额定转速下的标幺转速。

DFIG 的惯性时间约为 2~6 s，当系统发生波动，频率变化时其时长也在几十秒的数量级[15]，DFIG 自身动能可能无法在跌落的全时间内进行惯量支撑；并且当 DFIG 动能恢复时，其也将从电网较快吸收有功功率，可能造成电网频率的二次跌落。本文中，借助超级电容的快速响应特性，DFIG 的虚拟惯量控制直接由超级电容器储能提供，类比同步发电机转速正比于电网频率，其用电网频率变化表征转速变化计算虚拟惯量输出功率，由式(14)，储能虚拟惯量控制有功功率参考值 ΔP_E

$$\Delta P_E = K_E \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{15}$$

式中 K_E 为虚拟惯量系数。

需要说明的是，对于虚拟惯量控制，在频率变化的过程中，其起到减缓频率变化率的作用：在频率恶化的过程中，其减缓频率偏离的速度；反之，在系统频率恢复的过程中，如果引入虚拟惯量控制，其将减慢系统频率恢复正常的速度，增加系统频率恢复时长。所以在本文控制策略中，系统频率恢复时，虚拟惯量控制不使能。

2.2 频率下垂控制

对于同步发电机，当负荷增加时系统频率降低 Δf，在调速器的作用下，发电机输出增加为 ΔP_G，其有功功率-频率静态特性近似于一条直线，这条线的斜率即为频率调差系数 K_G

$$K_G = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} \tag{16}$$

K_G 表征了同步发电机参与调频的能力强弱，本文中的储能环节，使 DFIG 在系统频率跌落期间亦能够较长时间提供这种支持，即频率下垂控制，其频率下垂控制的功率参考 ΔP_G 为

$$\Delta P_G = -K_G(f_n - f) \tag{17}$$

综上，储能环节输出总功率的参考值 ΔP 为

$$\Delta P = \Delta P_{\mathrm{E}} + \Delta P_{\mathrm{G}} \tag{18}$$

在正常并网时，为了减少 DC-DC 变换器及控制系统的频繁开断，降低硬件损耗。根据《试验方法》，本文设置调差死区为 0.03 Hz，即频率波动绝对值小于 0.03 Hz 时，认为电网频率是正常无波动的，调频系统不工作。其有功功率出力策略见图 4。

2.3　储能系统配置方法

根据《实验方法》中提出，“有功出力最大值为 $0.1P_{\mathrm{n}}$ 且一次调频时间不大于 30 s”。故在此要求下，为应对双边频率调节，储能系统的容量 E_{es} 应满足大于 $2\times0.1P_{\mathrm{n}}\times30$ s，对储能系统的充/放电功率 P_{es} 要求为 $0.1P_{\mathrm{n}}$。考虑到 DC-DC 变换器及 GSC 环节两级并网，其电路总效率为 η_{c}，E_{es}、P_{es} 应满足

$$\begin{cases} E_{\mathrm{es}}\eta_{\mathrm{c}} > 0.2P_{\mathrm{n}}\cdot 30\ \mathrm{s} \\ P_{\mathrm{es}}\eta_{\mathrm{c}} > 0.1P_{\mathrm{n}} \end{cases} \tag{19}$$

储能系统选型存在以下约束[26-27]：

1）DC-DC 变换器设计约束：设计储能系统低压侧工作电压范围为 U_{dcmin}~U_{dcmax}，即对于额定电压为 U_{cell} 的储能单体(动力电池、超级电容)，其串联单体数量 N_{s} 为

$$N_{\mathrm{s}} = \frac{U_{\mathrm{dc\,max}}}{U_{\mathrm{cell}}} \tag{20}$$

2）功率约束：对于储能系统参与一次调节，其特点是对于充/放电功率的要求是对称的，即储能系统充/放电功率均需大于 $0.1P_{\mathrm{n}}$，考虑到对于动力电池，一般其充电倍率远小于放电倍率，所以在 N_{s} 确定下，并联单体数量 N_{p} 应取充/放电功率约束最大值

$$N_{\mathrm{p}} = \max\left(\frac{P_{\mathrm{es}}}{P_{\mathrm{in}}}, \frac{P_{\mathrm{es}}}{P_{\mathrm{out}}}\right) \tag{21}$$

其中，电容充/放电最大功率计算方法应由储能单体的最小工作电压 U_{cellmin} 最大持续充/放电电流 I_{max} 乘积决定。

3）容量约束：对于动力电池，其单体电池额定容量为 E_{cell}，在 N_{s} 确定下，容量约束串联单体数量 N_{p} 为

$$N_{\mathrm{p}} = \frac{E_{\mathrm{es}}}{N_{\mathrm{s}}E_{\mathrm{cell}}} \tag{22}$$

对于超级电容，其充放电能量一般由最大工作电压 U_{cmax}、最小工作电压 U_{cmin}、电容值 C_{cell} 确定

$$E_{\mathrm{cell}} = \frac{1}{2}C_{\mathrm{cell}}(U_{\mathrm{cmax}}^2 - U_{\mathrm{cmin}}^2) \tag{23}$$

代入式(22)，求得串联数量。

对于容量约束与功率约束，在满足本文对于储能系统要求下，取两个约束下 N_{p} 最大值。

2.4　1.5 MW 风机平台储能配置分析

对于风电储能系统的需求分析，本文选 1.5 MW DFIG 平台为例，给出其配置模式：

1)对于 1.5 MW 的风机，其直流母线电压约为 1 100 V，计及双向 DC-DC 变换器实用电压比[26]，所以本文对于低压侧最高电压 U_{dcmax} 的选取为 750 V。

2)动力电池单体及超级电容单体选取主流标准，分别以 A123-20Ah 动力电池和 Maxwell BCAP3000 型超级电容为例，具体参数见附录 A 表 A1 所示[28]。

根据 2.3 中给出储能配置方法，取电路效率 η_{c}=0.95，得到满足一次调节要求的储能单元配置情况如表 1 所示。

此种配置方法下，超级电容配置遵从容量约束，动力电池配置均遵从功率约束，其在容量上对于需求留有冗余。此时，超级电容功率为需求功率

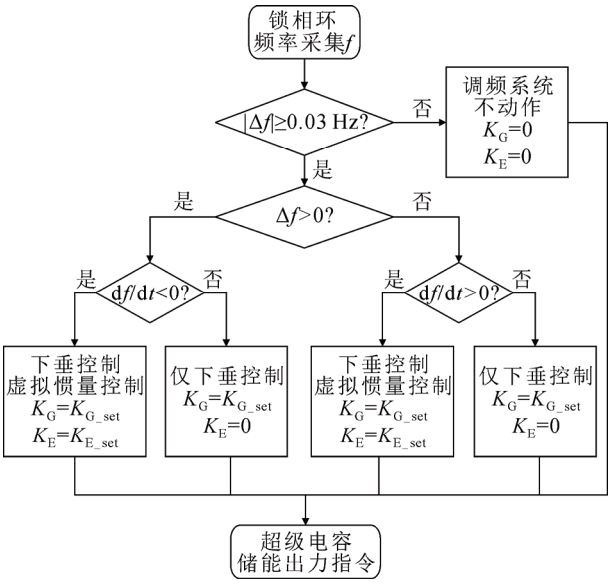


图 4　超级电容器储能参与调频过程中的有功出力策略

Fig.4　The active output strategy of super capacitor in the frequency modulation process

表 1　1.5 MW DFIG 储能配置情况

Table 1　1.5 MW DFIG energy storage configuration

参数	超级电容	动力电池
串联个数	278	228
并联个数	4(容量约束)	12(功率约束)
储能系统体积/m³	0.33	0.73
储能系统重量/kg	425.34	1 340.64

的 1.42 倍，且超级电容储能单元占用较小，可见超级电容的高功率密度、对称充放电倍率的特点更实用于风电调频。

3 DFIG 网侧变流器控制策略

3.1 电压下垂控制

在同步发电机并网时，同步发电机的无功-电压特性表现为：当电网电压 U_s 升高时，其输出的无功功率 Q_g 有所下降；电网电压 U_s 降低时相反。这种“负调压”的特性，提高了电力系统的稳定性，成为电压自治稳定的基础。其电压调差系数 K_V 为

$$K_V = -\frac{\Delta Q_g}{\Delta U_s} \tag{24}$$

传统 DFIG 控制方式中，其均采用单位功率因数并网，GSC 只作稳定直流母线电压的作用，无法在电压跌落时增发无功。为了提高 DFIG 接入系统的稳定性，在本文中，类似于同步发电机，借助 GSC 的逆变能力，提出了 GSC 提供电压下垂特性，得到 GSC 无功功率参考值，其中 U_n 为 DFIG 接入公共母线额定电压

$$\Delta Q_g = -K_V(U_n - U_s) \tag{25}$$

本文中，GSC 起无功补偿作用，故当风机母线电压处于正常电压偏移时，其电压下垂控制不使能。同时，考虑到 GSC 容量限制，在电压下垂控制中，根据式(9)加入 GSC 无功限幅范围，电压下垂控制策略如图 5 所示。

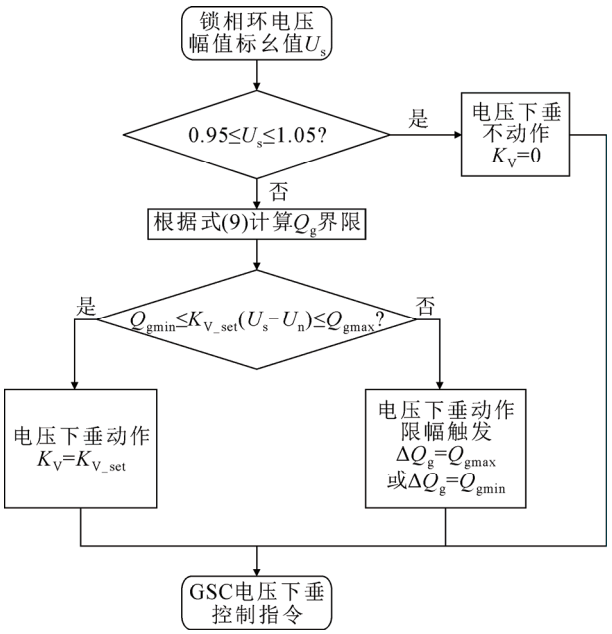


图 5 GSC 参与调压过程的电压下垂控制策略

Fig.5 Voltage sag control strategy for GSC participation in voltage regulation process

3.2 GSC 协同控制策略

对于 GSC，经过帕克变换，其 d 轴、q 轴输出电压电流分别为 e_d、e_q、i_d、i_q。根据瞬时功率理论，其瞬时功率 p、q 有

$$\begin{cases} p = \dfrac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \\ q = \dfrac{3}{2}(e_d i_q - e_q i_d) \end{cases} \tag{26}$$

基于电网电压矢量定向时，GSC 交流侧接电网电压 u_s，此时 $e_d=u_s$, $e_q=0$。代入式(26)，可得

$$\begin{cases} p = \dfrac{3}{2}u_s i_d \\ q = \dfrac{3}{2}u_s i_q \end{cases} \tag{27}$$

对于经由直流母线输出的调频有功输出，虽然由于 i_d 的控制外环为直流电压外环，在稳定直流母线电压的控制目标下可以将超级电容输出的有功逆变输出，但当超级电容响应虚拟惯量控制时，其输出功率变化率 $\mathrm{d}P_{sc}/\mathrm{d}t$ 较大，作为功率交换点的直流母线电容，可能会出现直流母线电压较大偏移的问题。

针对以上问题，本文提出 GSC 有功协同控制策略，即 GSC 与 DC-DC 变换器同时获得功率指令，GSC 的虚拟惯量控制功率指令直接引入 i_d，变为独立于直流母线电压波动的解耦项，避免直流母线处功率不平衡。由式(27)，其解耦项 Δi_d 为

$$\Delta i_d = \frac{2}{3}\frac{\Delta P_E}{U_s} = \frac{2}{3}\frac{K_E}{U_s}\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{28}$$

综合双向 DC-DC 变换器控制策略及 GSC 协同控制策略，本文提出基于超级电容储能的 DFIG 一次调节控制结构如图 6 所示。

4 仿真分析

为验证所提控制方法对系统频率和电压控制的有效性，本文选取风电场−同步机组微网系统进行仿真。其中，风电场由 300 台 1.5 MW DFIG 组成，风场风速 10 m/s，其一次调节功率范围依据 1.2 节所提调节方法需求确定，GSC 容量配置与 1.2 节中分析对象相同。同步机系统由 1 000 MW 同步发电机组及负荷组成，风电场经由 30 km 线路接入系统。拓扑如图 7 所示，系统参数见附录 A 表 A2。

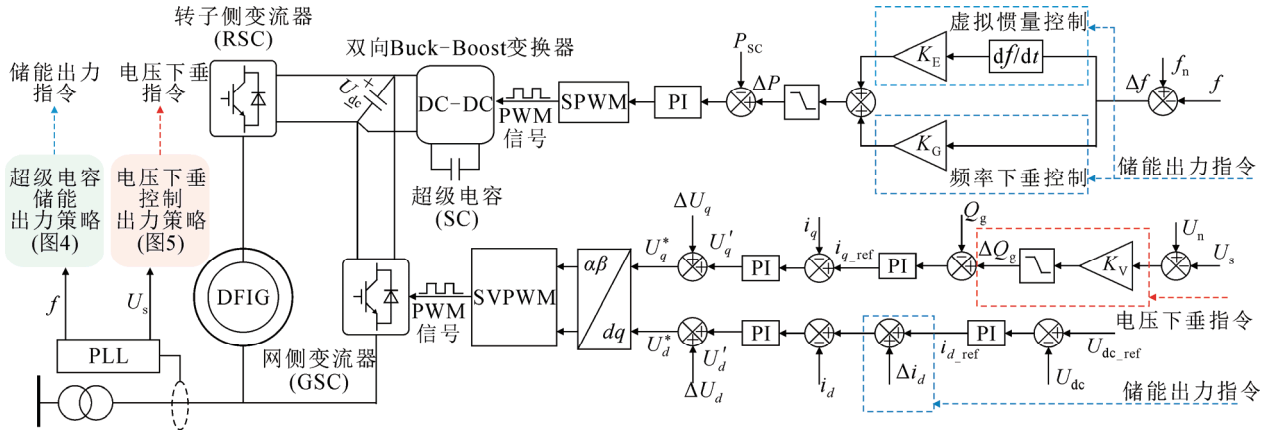


图 6　基于超级电容储能的 DFIG 一次调节控制结构

Fig.6　Primary regulation control strategy of DFIG based on super capacitor energy storage

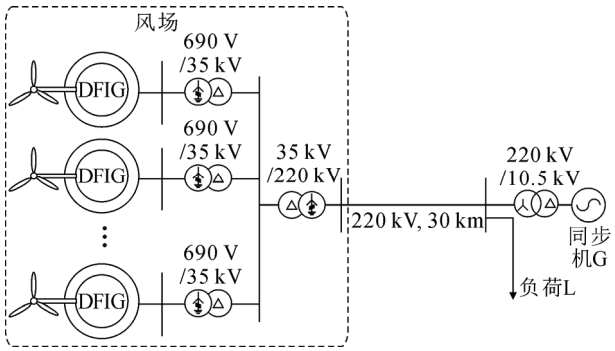
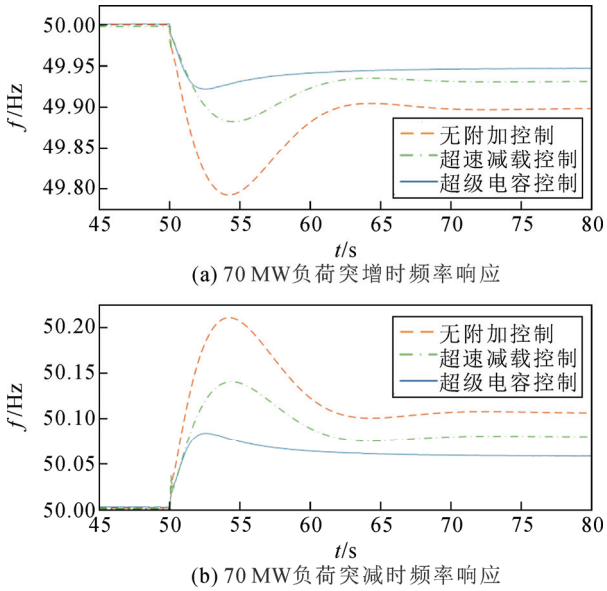


图 7　仿真基于的风电场−同步机微网系统

Fig.7　Simulation-based wind farm-synchronous machine microgrid system



(a) 70 MW负荷突增时频率响应

(b) 70 MW负荷突减时频率响应

图 8　有功负荷突变系统频率响应

Fig.8　Frequency response of system with 70 MW active power sudden change

4.1　系统负荷有功−频率波动算例

采用无附加控制、超速减载控制对比本文提出超级电容控制验证频率控制有效性。

在 50 s 时，有功负荷突增/突减 70 MW。此时，DFIG 在无附加控制、超速减载控制以及本文提出超级电容控制方式下，系统频率变化如图 8 所示。

有功负荷突增 70 MW 情况下，无附加控制稳态误差约为 0.1 Hz，在超速减载控制下，虽然较无附加控制，其频率波动超调较小，但由于减速达到最大功率有限，在突增负荷约 15 s 后，稳态频率误差约为 0.07 Hz。在本文提出的超级电容控制方式下，超调量及最大频率波动进一步减少，最终稳态误差为 0.05 Hz，较上述两种控制方式分别减少了 50%、29%。调频过程中，超级电容器电压、电流、荷电状态(state of charge, SOC)如附录图 B1 所示。

在负荷突减情况，3 种控制方式下频率上升，无附加控制下稳态误差约为 0.11 Hz。虽然此时超速减载控制可以持续响应，但受运行转速范围限制，其调节能力有限，稳态误差约为 0.08 Hz。超级电容控制超调量及稳态频率误差较小，为 0.06 Hz，其稳态频率偏差较无附加控制减少约 45%，较超速减载控制减少约 25%。负荷突减调频过程中，超级电容器各电气量如附录图 B2 所示。

4.2　系统负荷无功−电压波动算例

在 50 s，系统负载增加/减少 60 MVA 感性无功负载，在 GSC 无附加控制与本文提出的无功下垂控制下，DFIG 接入公共母线电压如图 9 所示。

在无功负荷变化下，GSC 电压下垂控制有效抑制了电压波动，其超调约为无附加控制的 1/3，其稳定后稳态误差基本归零，小于无附加控制。

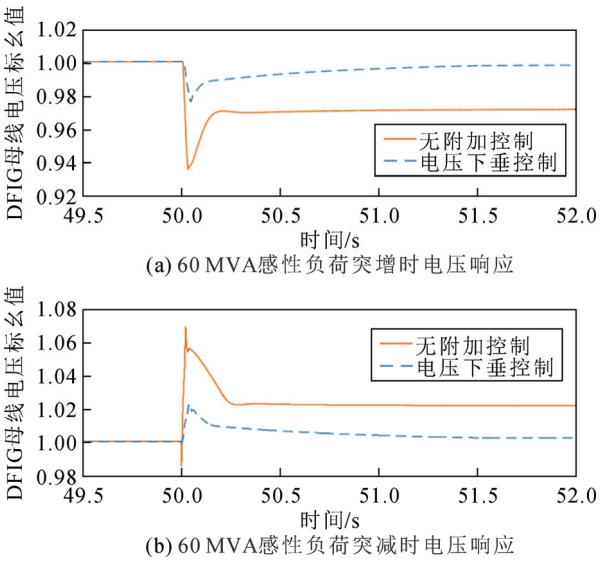


图 9 60 MVA 感性无功突增/突减公共母线电压响应

Fig.9 Voltage response of PCC with 60 MVA reactive power sudden increase/decrease

5 实验验证

本文基于 10 kW 双馈风力发电实验平台进行验证。实验平台由一台 15 kW 异步电机作为原动机，经联轴器拖动一台 10 kW 双馈感应发电机，DFIG 母线接入电网模拟器并网发电。原动异步电机采用矢量控制，经变频器接入市电作为拖动电源，其变频器程序可以实现对风速、风轮、桨距角、齿轮箱的模拟。储能部分由 4 组 110 V，7 F 超级电容模块组成(2 串 2 并)，满足式(19)对超级电容储能的要求。储能部分经过双向 DC-DC 变换器并联于直流母线。RSC 使用 DSP 控制，工作在 MPPT 模式下；GSC、DC-DC 变流器通过快速原型控制器(rapid control prototype, RCP)在上位机实时控制，实现上文所述的控制模式，一次调节功率范围同 1.2 分析。DFIG 实验系统见图 10，其运行参数如附录 A 表 A3 所示。

5.1 基于超级电容储能的一次调频与惯量支撑策略

为验证本文提出控制策略的有效性，选取了 3 组频率曲线输入电网模拟器复现电网的频率跌落过程，过程前 10 s 电网维持 50 Hz 频率。在 10 s 时开始频率跌落，经过 0.5 s 后频率跌落完毕，目标值分别为 49.9 Hz、49.8 Hz、49.7 Hz。经过 30 s 的低频过程后，再经过 0.5 s 回升，在 41 s 时至 50 Hz。相似的，在第 55 s 引入频率上升，经过 0.5 s 分别上升至 50.1 Hz、50.2 Hz、50.3 Hz，经过 30 s 的高频过程后，再经过 0.5 s 回升，最终在 86 s 恢复至 50 Hz，3 组设定频率曲线如图 11 所示。



图 10 10 kW DFIG 实验系统

Fig.10 10 kW DFIG experimental system

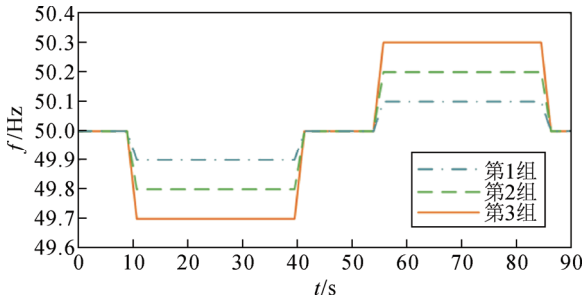


图 11 给定电网频率变化

Fig.11 Given grid frequency change

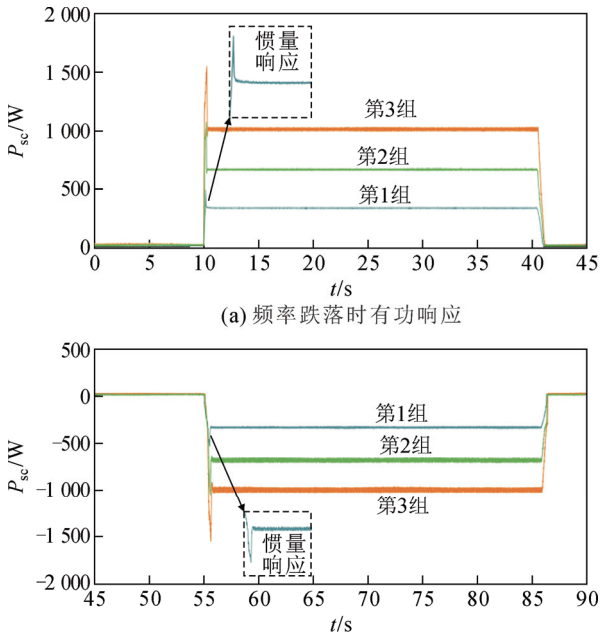
期间，直流侧输出功率响应如图 12 所示。

引入超级电容储能进行有功支撑，超级电容器调频过程中各电气量如附录 B 图 B3、图 B4 所示。在当前控制策略下，其精确实现了有功的下垂控制和惯量支撑，在频率下降时输出有功功率，频率上升时吸收有功功率，模拟了同步机的有功特性。且在频率恶化时实现了惯量响应，减缓频率恶化过程，频率恢复时，避免了惯量过程，加快频率的恢复。提升了 DFIG 并网的致稳性。

图 13 说明，本文提出 GSC 控制方式下，超级电容交换最大有功功率时，其并联的直流母线电压是较为稳定的。但在 GSC 无协同控制下，其提供惯量支撑时直流母线电压偏差较大，存在 20 V 左右的电压偏移，这可能是虚拟惯量控制时间尺度小、瞬时输出功率变化量较大造成的。加入本文提出 GSC 解耦协同控制策略后，在频率波动期间，直流母线电压波动进一步减小，证明此协同控制提高了直流母线电压的稳定性，直流母线的偏移满足要求。

5.2 不同频率控制策略调频范围对比分析

为验证本文所提出超级电容控制其调节范围较大的特点，引入减载率为 10%的超速减载控制实



(a) 频率跌落时有功响应

(b) 频率升高时有功响应

图 12　电网频率变化下的超级电容有功响应

Fig.12　Active power response of supercapacitor during grid frequency change

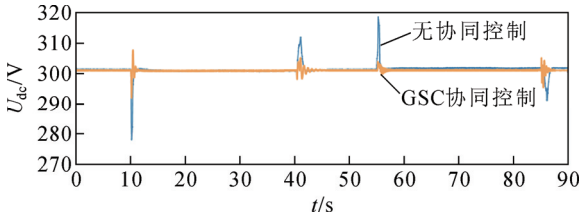


图 13　一次调频中直流母线电压波动

Fig.13　DC bus voltage fluctuation during Primary frequency modulation

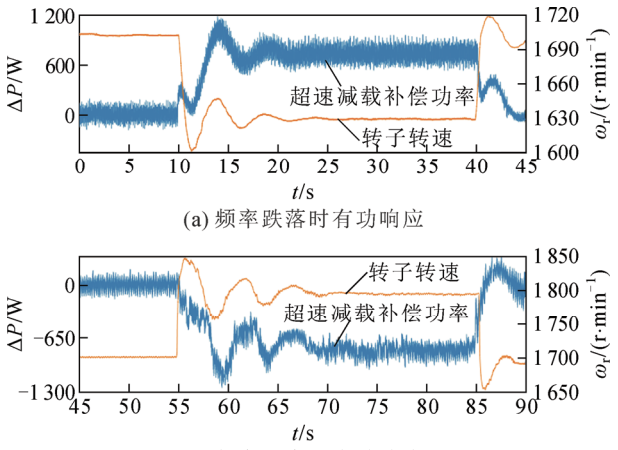
验作为对比。与超级电容控制相似的，令超速减载控制按同下垂系数响应图 11 中第 3 组频率变化，超速减载控制响应输出补偿功率 ΔP 及对应时刻转子转速如图 14 所示。

可以看出，当转子转速达到 MPPT 转速时，其输出补偿功率约为 750 W；转速上升至最大转速(1 800 r/min)时，其补偿功率约为吸收 750 W。

动态响应性能上，由于超速减载补偿功率来源于转子转速变化，其响应时间较长，且存在超调量，无法做到超级电容控制的快速响应。

静态调节范围上，由于超速减载控制补偿功率范围界限分别为 MPPT 及最大转速限制，其在实验中体现为上下单边调节范围均为 750 W 左右，较超级电容控制 0.1P_n 的调节范围更小。

实验中，减载率 10%的超速减载控制其正常工



(a) 频率跌落时有功响应

(b) 频率升高时有功响应

图 14　第 3 组电网频率变化过程中 DFIG 超速减载补偿功率及转速变化

Fig.14　The third group of power grid frequency changes in the process of DFIG overspeed load reduction compensation power and speed changes

况输出功率为 6 650 W 左右，而超级电容控制可在正常工况及调节工况全程维持 DFIG 本体 MPPT 输出约 7 400 W 的最大功率，其发电效率较超速减载提升 11.2%。

5.3　基于 GSC 的无功−电压下垂控制

为了测试利用 GSC 的空闲容量进行无功−电压下垂控制的有效性，利用电网模拟器引入 10 s 持续 10 s 的电压波动，电压降低分别跌落至额定电压的 0.75、0.5、0.35、0.25 倍，电压升高分别抬升至额定电压的 1.25、1.5、1.65、1.75 倍。

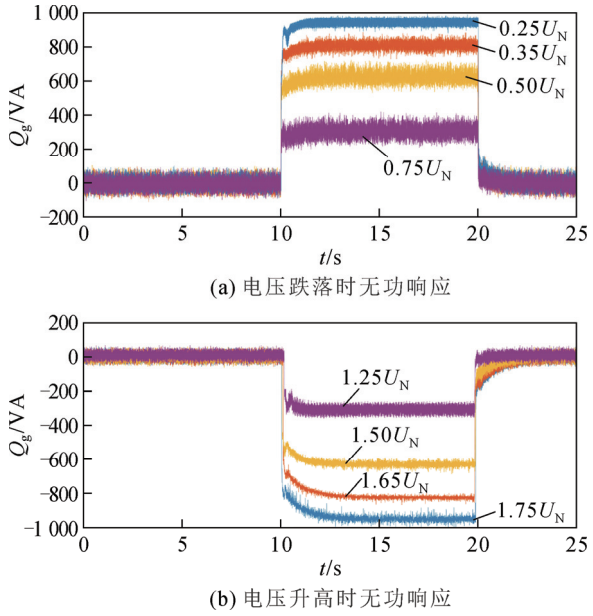
图 15 为无功−电压下垂控制策略下 GSC 无功功率输出测试波形。测试组均实现了无功下垂特性。可以表明，在电压跌落时，GSC 利用其空闲逆变能力输出无功功率，在电压下垂控制下，为电网提供了快速精准的无功支撑。

6　结论

本文将超级电容储能接入 DFIG 直流母线侧，在基于储能参与有功调频的思想上，分析了 GSC 调节能力可以满足一次调节功率需求，并且仍有备用容量，设计一次调节策略及 GSC 协同控制结构。提出了基于超级电容储能的一次调节方法：

1）在满足一次调节容量需求同时，超级电容功率为需求的 1.42 倍。其适合于风力发电一次调频使用。

2）引入仿真算例证明：较无附加控制、超速



(a) 电压跌落时无功响应

(b) 电压升高时无功响应

图 15 电网电压波动下的 GSC 无功响应

Fig.15 GSC reactive power response during grid voltage change

减载控制，频率波动下稳态误差至少提升 45%、25%，频率稳定时间缩短 50%；较无电压控制，其波动下电压稳态误差可基本消除。

3）基于 10 kW 双馈风力发电实验平台：超级电容器能够快速的输出一次调频给定功率，其双边持续调节能力较超速减载控制大 0.25 kW，同时发电效率高 10%以上，GSC 协同控制下直流母线电压波动为传统控制 50%以下；GSC 无功控制实现了在电压跌落下其快速精准的无功支撑，验证了本文所提方法的先进性。

本文避免了传统虚拟惯量控制频率导致二次跌落的问题，且 DFIG 在其运行全过程中工作于 MPPT 模式，保证了 DFIG 的发电效益。同时，实现 GSC 侧的无功输出，加快 DFIG 对于无功需求的响应速度和补偿连贯性。降低了其与储能间协调控制复杂程度，快速准确提供功率支持。该方法提高了 DFIG 并网致稳性，给已有双馈风机提供了一种简便经济的改进方法。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 国家能源局. 国家能源局 2021 年一季度网上新闻发布会[EB/OL]. (2021-01-30)[2022-09-28]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c_139708580. htm.
National Energy Administration. Online press conference of national energy administration in the first quarter of 2021[EB/OL]. (2021-01-30) [2022-09-28]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c_139708580.htm.

[2] 吴子双，于继来，彭喜云. 高风速段次优功率追踪方式的风电调频方法[J]. 电工技术学报，2013，28(5)：112-119.
WU Zishuang, YU Jilai, PENG Xiyun. DFIG's frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 112-119.

[3] 隗霖捷，王德林，李 芸，等. 基于可变系数的双馈风电机组与同步发电机协调调频策略[J]. 电力系统自动化，2017，41(2)：94-100.
WEI Linjie, WANG Delin, LI Yun, et al. Variable coefficient based coordinated frequency modulation strategy between DFIG-based wind turbine and synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 94-100.

[4] 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.

[5] 米增强，刘力卿，余 洋，等. 限电弃风工况下双馈风电机组有功及调频控制策略[J]. 电工技术学报，2015，30(15)：81-88.
MI Zengqiang, LIU Liqing, YU Yang, et al. The control strategy of active power and frequency regulation of DFIG under wind abandon condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 81-88.

[6] 李少林，秦世耀，王瑞明，等. 一种双馈风电机组一次调频协调控制策略研究[J]. 太阳能学报，2020，41(2)：101-109.
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. A collaborative control of primary frequency regulation for DFIG-WT[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(2): 101-109.

[7] 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.

[8] 邢鹏翔，侍乔明，王 刚，等. 风电机组虚拟惯量控制的响应特性及机理分析[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1302-1310.
XING Pengxiang, SHI Qiaoming, WANG Gang, et al. Response characteristics and mechanism analysis about virtual inertia control of wind generators[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1302-1310.

[9] 边晓燕，张菁娴，丁 炀，等. 基于 DFIG 虚拟惯量的微电网双维自适应动态频率优化控制[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1489-1498.
BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, DING Yang, et al. Double layer adaptive dynamic frequency optimization control of microgrid based on DFIG virtual inertia[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1489-1498.

[10] 邓 霞，孙 威，肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1157-1165.
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1157-1165.

[11] 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. Optimization scheme selection of wind farm participation in grid primary frequency modulation and study of wind-storage coordination control strategy[J]. Journal of

Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 44-52.

[12] 苗福丰，唐西胜，齐智平. 风储联合调频下的电力系统频率特性分析[J]. 高电压技术，2015，41(7)：2209-2216.
MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Analysis of frequency characteristics of power system based on wind farm-energy storage combined frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2209-2216.

[13] 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.

[14] Australian energy market operator. Black system south Australia 28 September 2016: final report[R]. Melbourne, Australia: Australian Energy Market Operator, 2017.

[15] The British Electricity System Operator. Appendices to the technical report on the events of 9 August 2019[R]. Warwick, England: National Grid ESO, 2019.

[16] 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)：111-120.
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): 111-120.

[17] 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 regulation control strategy of doubly-fed induction generator considering supercapacitor SOC feedback adaptive adjustment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1027-1039.

[18] 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.

[19] 张　鹏，张　峰，梁　军，等. 采用小波包分解和模糊控制的风电机组储能优化配置[J]. 高电压技术，2019，45(2)：609-617.
ZHANG Peng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system for wind farm using wavelet packet decomposition and fuzzy control[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 609-617.

[20] 吴　峰，韩庭苇，黄弘扬，等. 含柔性直流输电的海上风电场群无功控制策略[J]. 可再生能源，2019，37(5)：676-682.
WU Feng, HAN Tingwei, HUANG Hongyang, et al. Reactive power coordinated control strategy for offshore wind farm cluster with VSC-HVDC transmission[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(5): 676-682.

[21] AKHMATOV V, SØBRINK K. Static synchronous compensator (Statcom) for dynamic reactive-compensation of wind turbines[J]. Wind Engineering, 2006, 30(1): 43-54.

[22] 杨　硕，王伟胜，刘　纯，等. 双馈风电场无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化，2013，37(12)：1-6.
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative control strategy for reactive power and voltage of wind farms with doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 1-6.

[23] 栗　然，唐　凡，刘英培，等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报，2012，32(19)：16-23.
LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. A new scheme of reactive power compensation and voltage control for DFIG based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 16-23.

[24] 国电南自公司. 双馈式风力发电变流器手册[EB/OL]. (2010-06)[2022-09-28]. http://www.sacchina.com/webfront/common/info/ productInfoList/pageNo/1/cplxbm.
Guodian Nanzi Company. Manual of doubly fed wind power converter [EB/OL]. (2010-06)[2022-09-28]. http://www.sac-china.com/webfront/common/info/productInfoList/pageNo/1/cplxbm.

[25] 国家电网企业标准. 风电机组虚拟同步发电机技术要求和试验方法：Q/GDW 11826—2018[EB/OL].[2022-09-28]. https：//www. doc88.com/p-19659446113491. html.
National Grid Enterprise Standard. Technical requirements and test methods for virtual synchronous generators of wind turbines: Q/GDW 11826—2018[EB/OL]. [2022-09-28]. https://www.doc88.com/p-19659446113491. html.

[26] 沈小军，曹　戈. 城轨交通制动能量回收超级电容储能阵列配置方法对比分析[J]. 电工技术学报，2020，35(23)：4988-4997.
SHEN Xiaojun, CAO Ge. Comparative analysis on configuration methods of supercapacitor array for braking energy recovery of urban rail transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23): 4988-4997.

[27] 王伟达，王言子，项昌乐，等. 混合动力车制动工况分析与储能装置参数匹配[J]. 哈尔滨工业大学学报，2014，46(9)：74-79.
WANG Weida, WANG Yanzi, XIANG Changle, et al. Analysis of brake condition and parameter matching of hybrid energy storage system for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(9): 74-79.

[28] 王言子. 车用复合储能装置的设计与功率分配策略研究[D]. 北京：北京理工大学，2016.
WANG Yanzi. Research on the design and power split strategy of hybrid energy storage system in vehicle[D]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology, 2016.



颜湘武
1965—，男，博士，教授，博导
要研究方向为新能源电力系分析与控制、现代电力与变换、新型储能与节能等
E-mail: xiangwuy@ncepu.edu.cn

YAN Xiangwu
Ph.D., Professor



李锐博(通信作者)
1997—，男，博士生
主要研究方向为并网新能源发电控制等
E-mail: liruibo@ncepu.edu.cn

LI Ruibo
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期　2021-06-29　在线出版日期　2021-10-26　　编辑　陈　蔓

附录 A

表 A1　储能单体选型及其参数

Table A1　Energy storage monomer selection and its parameters

储能形式	参　数	数值
超级电容	型号	BCAP3000
	标称容值 C_{cell}/F	3000
	最大工作电压 $U_{cellmax}$/V	2.7
	最小工作电压 $U_{cellmin}$/V	1.2
	最大连续工作电流 I_{max}/A	160
	重量 (kg)	0.51
	尺寸(mm)	ϕ60×139
	功率密度(W/kg)	5900
	能量密度(Wh/kg)	6.0
动力电池	型号	A123-20Ah
	额定容量 E_n/Wh	65
	额定电压 V_{cell}/V	3.3
	最大充/放电倍率	1C/7C
	最大充电功率 P_{in}/W	64
	最大放电功率 P_{out}/W	448
	重量(kg)	0.49
	尺寸(mm)	7.3×160×227
	功率密度(W/kg)	2400
	能量密度(Wh/kg)	247

表 A2　仿真算例参数

Table A2　Simulation study parameter values

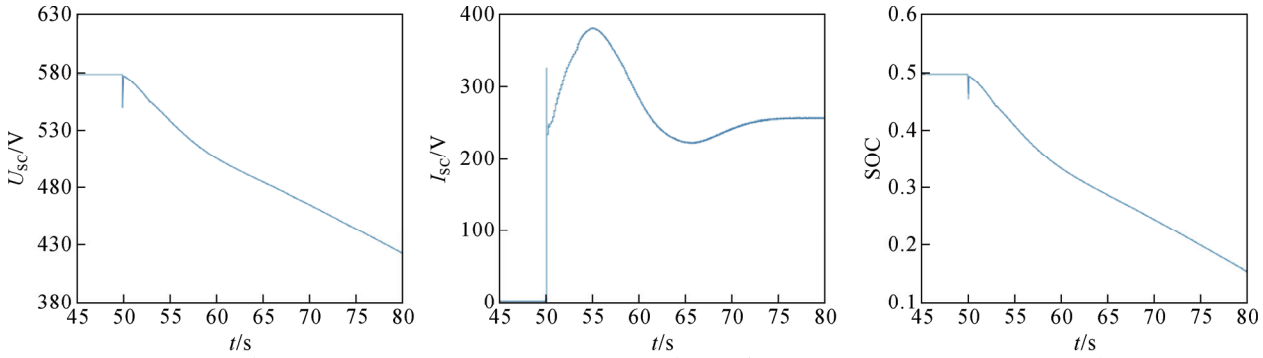
部件	参　数	数值
双馈感应发电机	额定功率 P_n/MW	1.5
	额定电压 U_e/V	690
	风速 v/(m/s)	10
	超速减载率	10%
	定子电阻 R_s/pu	0.001
	定子漏感 $L_{s\sigma}$/pu	0.8
	转子电阻 R_r/pu	0.01
	转子漏感 $L_{r\sigma}$/pu	0.1
网侧变流器	额定容量 S_{GSC}/kVA	420
	额定电压 U_g/V	690
系统	同步发电机额定容量 S_G/MW	1000
	负载有功 P_L/MW	650
	负载无功 Q_L/MVar	60

表 A3　10kW DFIG 实验系统运行参数

Table A3　DFIG experimental system operating parameters

部件	参　数	数值/类型
双馈风电机组	风速 v/(m/s)	10
	桨距 A/(°)	0
	叶轮半径 R/m	3.2
	齿轮比 i	6
	极对数 n	2
	DFIG 额定功率 P_n/kW	10
	网侧变流器容量 P_{GSC}/kW	5
	直流母线电压 V_{dc}/V	300
超级电容储能系统	额定容量 C/F	7
	最高工作电压 U_{max}/V	220
	最低工作电压 U_{min}/V	110
	最大连续电流 I_{max}/A	10
	等效内阻 R/Ω	1.12
	超级电容组结构	2 串 2 并

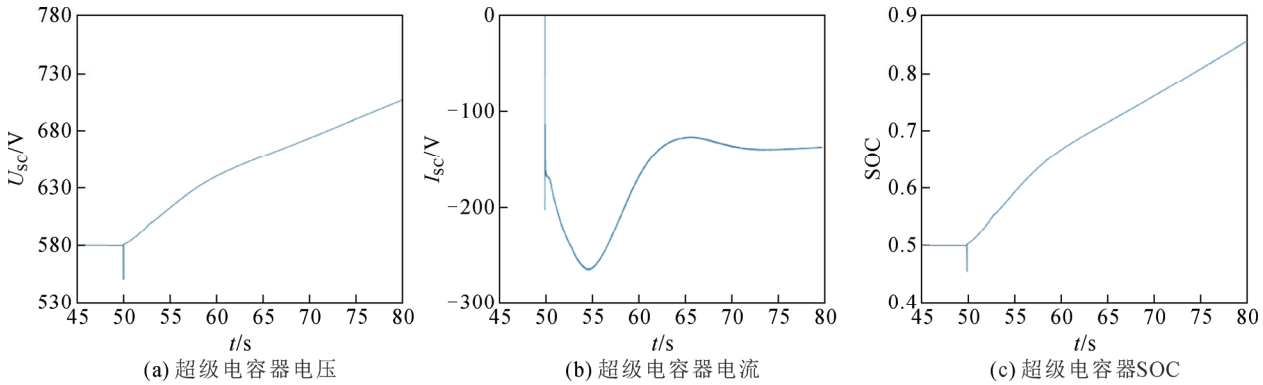
附录 B



(a) 超级电容器电压　(b) 超级电容器电流　(c) 超级电容器SOC

图 B1　仿真中有功负荷突增超级电容响应

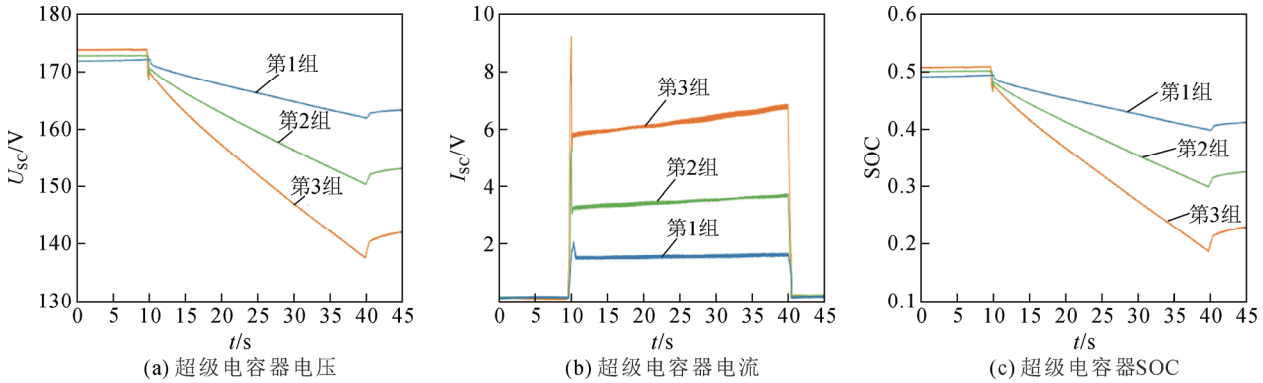
Fig.B1　Active load surge supercapacitor response in simulation



(a) 超级电容器电压　(b) 超级电容器电流　(c) 超级电容器SOC

图 B2　仿真中有功负荷突减超级电容响应

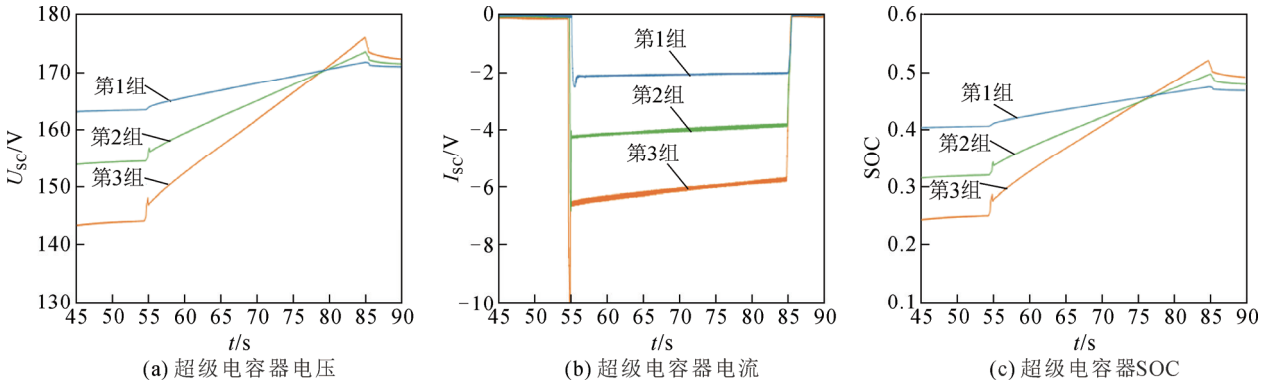
Fig.B2　Sudden active load reduction supercapacitor response in simulation



(a) 超级电容器电压　(b) 超级电容器电流　(c) 超级电容器SOC

图 B3　实验中频率突减超级电容响应

Fig.B3　Experimental frequency-surge supercapacitor response



(a) 超级电容器电压　(b) 超级电容器电流　(c) 超级电容器SOC

图 B4　实验中频率突增超级电容响应

Fig.B4　Frequency Surge Supercapacitor Response in Experiment