

基于超级电容的光伏并网功率波动平抑控制方法

徐国圣, 石 洋, 洪 岩

国网江苏省电力有限公司 泗阳县供电分公司, 江苏 宿迁 223700

摘 要:目的 针对光伏发电功率波动、单相全桥并网变换器二倍频功率波动,以及超级电容系统平抑光伏发电功率波动时,其端电压大范围波动造成的越限等问题,提出一种基于超级电容的光伏并网功率波动平抑方法。方法 首先,通过在控制环路中串入陷波滤波器将系统二倍频功率分离,将波动功率作为超级电容响应的参考值,减少单相全桥变换器的并网功率波动对电能质量的影响;然后,在超级电容控制环路中并入端电压瞬态恢复调节控制,实现超级电容在动态响应后及时恢复能量,为后续功率波动平抑储备能量;其次,针对直流母线电压的高频波动,在超级电容控制环路占空比中直接并入电压高频波动平抑控制,进一步提高直流母线电压的电能质量。结果 通过建立并网系统仿真模型,验证功率波动平抑方法的有效性和可靠性。结论 试验结果表明:并网功率波动平抑控制方法不仅实现了波动功率的合理分配,同时有效避免了超级电容端电压的越限,且提高了直流母线电压的电能质量。

关键词:光伏;超级电容;功率分配策略;陷波滤波器

中图分类号:TM53;TM615 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0005.013

Smoothing Control of PV Grid-connected Power Fluctuation Based on Supercapacitor

XU Guosheng, SHI Yang, HONG Yan

Siyang Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Jiangsu Suqian 223700, China

Abstract: **Objective** Aiming at the issues of power fluctuations in photovoltaic (PV) generation, double-frequency power fluctuations in single-phase full-bridge grid-connected inverters, and the large voltage fluctuations in supercapacitor systems when smoothing PV power fluctuations that may cause over-limit problems, a method for smoothing PV grid-connected power fluctuations based on supercapacitors is proposed. **Methods** Firstly, the two-frequency power of the system is separated by inserting a notch filter into the control loop and the fluctuating power is used as the reference value for the supercapacitor response to reduce the impact of grid-connected power fluctuations of the single-phase full-bridge converter on power quality. Secondly, a terminal voltage transient recovery control is integrated into the supercapacitor control loop to ensure that the supercapacitor can promptly restore its energy after dynamic response and reserve energy for subsequent power fluctuation smoothing. Thirdly, to address the high-frequency voltage fluctuations on the DC bus, a voltage high-frequency fluctuation smoothing control is directly incorporated into the duty cycle of the supercapacitor control loop, so as to further improve the power quality of the DC bus voltage. **Results** The effectiveness and reliability of the power fluctuation smoothing method are verified through the establishment of a grid-connected system simulation model. **Conclusion** The experimental results show that the grid-connected power fluctuation smoothing control method not only achieves rational distribution of fluctuating power but also effectively avoids over-limit voltage issues in supercapacitors and improves the power quality of the DC bus voltage.

Keywords: photovoltaic; supercapacitor; power distribution strategy; notch filter

收稿日期:2023-12-08 修回日期:2024-04-09 文章编号:1672-058X(2025)05-0100-07

基金项目:宿迁市指导性科技计划项目(Z2022024)。

作者简介:徐国圣(1995—),男,吉林辽东人,助理工程师,从事输电线路运检研究。

通信作者:洪岩(1994—),男,江苏宿迁人,硕士,工程师,从事电力电子技术、新能源发电和微电网等研究。Email: sky-in-sky@live.hk.

引用格式:徐国圣,石洋,洪岩. 基于超级电容的光伏并网功率波动平抑控制方法[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(5):100-106.

XU Guosheng, SHI Yang, HONG Yan. Smoothing control of PV grid-connected power fluctuation based on supercapacitor[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(5): 100-106.

1 引言

光伏发电的间歇性和随机性存在影响电力系统稳定性的可能^[1-3],采用储能平抑光伏发电功率波动的方法得到了学术界和工业界的广泛关注^[4-5]。然而,光伏并网系统中,蓄电池加入势必会增加系统设计的成本及控制的复杂度,且电池循环寿命有限。

超级电容作为一种功率型储能介质,能够用于响应短时高峰值功率需求,在平抑功率波动的场合得到了广泛的关注^[6-7]。文献[8]针对功率波动对电力系统稳定性造成的冲击,采用超级电容直接接入母线的结构,提出协调光伏和超级电容的模糊控制,减少了光伏电池输出功率波动;然而,超级电容直接接入母线的结构,必定带来直流母线电压的波动,且在光伏发电系统启动过程中,需要较多的能量才能建立母线电压。文献[9]通过双向 buck/boost 变换器将超级电容接入直流母线,克服了超级电容端电压变化的影响;但受限于超级电容的配置容量,在响应功率波动需求后,超级电容存在大范围波动可能,造成端电压越限,甚至出现低端电压大电流造成变换器的损坏。而且,超级电容仅用于控制直流母线电压,未考虑光伏发电波动功率在超级电容和并网变换器间的分配问题,且并网变换器为三相全桥拓扑,适用于大功率场合。

针对户用光伏发电小功率场合,通常采用单相全桥变换器拓扑,输出功率存在二倍频功率波动,导致直

流母线电压出现二倍频纹波,进而影响并网电能质量。虽然增加母线电容容值或额外补偿电路,具有一定抑制电压波动的效果,但是会增加系统设计成本和体积^[10-13]。而且直流母线电容承载较多的波动功率会影响其使用寿命,降低可靠性^[14],因此,软件方法受到更多的关注。文献[15]采用鲁棒滑模电压控制实现直流电压跟踪;文献[16]电压采样前加入周期积分器抑制直流母线电压二次纹波的影响;文献[17]通过母线电压修正调制波,无需提取电压纹波分量,具有简单易实现等优势;文献[18]通过调节电压外环的带宽,对抑制母线电压二次纹波也有一定的效果,但会影响系统动态性能。

本文提出一种光伏并网功率平抑控制方法,通过陷波滤波器将二倍频功率分离,减少单相并网功率波动对电能质量的影响;通过对超级电容端电压的控制,实现动态响应后的能量恢复;采用直接占空比平抑直流母线电压的高频振荡;最后,仿真实验验证了所提方法的有效性。

2 系统结构与运行策略设计

2.1 系统结构

图1为光伏-超级电容系统结构图。由光伏电池和 boost 变换器构成光伏发电系统,超级电容和 buck/boost 变换器构成超级电容系统,380 V 直流母线和 200 V 单相交流母线由单相全桥变换器连接,单相交流母线还接有电网和家用负载。

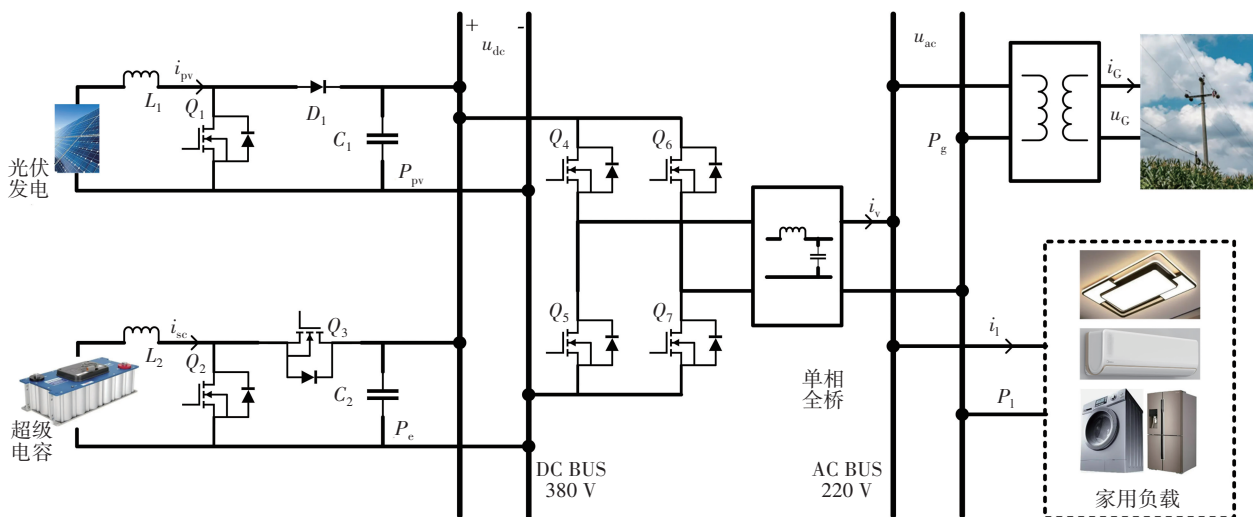


图1 光伏-超级电容系统结构

Fig. 1 Photovoltaic-supercapacitor system structure

考虑光伏系统发电功率的等级较高,可对光伏电池单体进行组串,串联数量决定了光伏系统的端电压大小,光伏系统电流由并联数量决定。

光伏发电易受到太阳辐照和温度等外界影响,造成系统发电功率波动。超级电容作为光伏发电的缓冲单元,吸收光伏发电的高频波动功率。单相全桥变换

器作为并网变换器,将发电功率传输给电网,不仅受到光伏发电功率波动的影响,同时单相全桥存在二倍频的功率波动。为了提高直流母线电压的电能质量,将波动功率转移到超级电容,让超级电容响应所有的功率。

2.2 运行策略设计

针对光伏发电功率波动、单相全桥变换器二倍频

率波动,以及直流母线电压高频波动的问题,本文采用超级电容作为能量缓冲单元,平抑功率波动,同时考虑超级电容消纳功率波动过程中的端电压变化范围。

图 2 为本文所提的功率波动平抑控制方法。超级电容变换器和单相全桥并网变换器由直流母线电

压控制。针对单相全桥变换器的二倍频波动、超级电容端电压波动、直流母线电压高频波动问题,控制方法中分别对应陷波滤波器部分、超级电容端电压控制、直流母线直接占空比控制 3 个部分。详细控制流程如下:

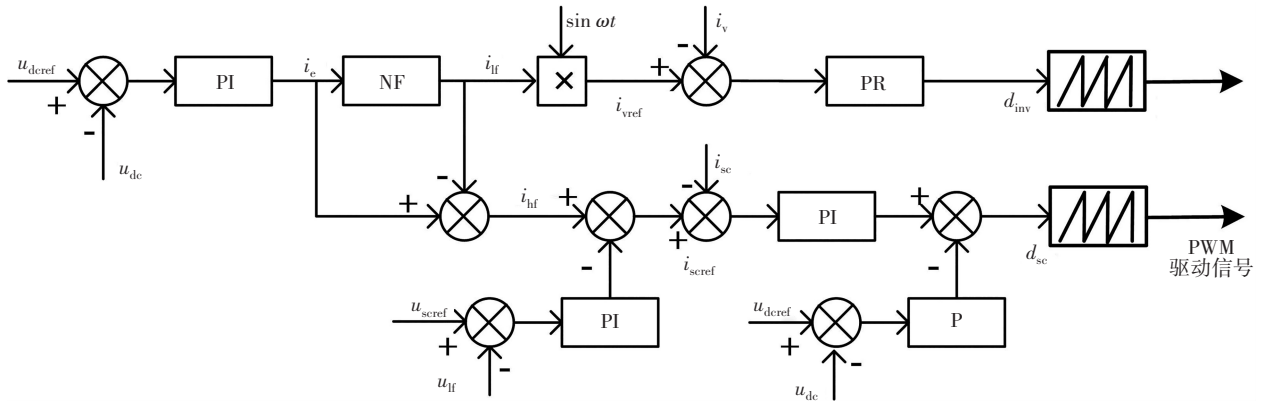


图 2 系统协同运行控制框图

Fig. 2 Control block diagram of system cooperative operation

(1) 超级电容变换器和单相全桥并网变换器共用电压环控制,根据直流母线电压的偏差,经过 PI 调节器得到系统功率波动电流 i_e ,可表示为

$$i_e = \left(k_{pu} + \frac{k_{iu}}{s} \right) (u_{dref} - u_{dc}) \quad (1)$$

式(1)中, k_{pu} 和 k_{iu} 分别为电压环控制器的比例和积分系数, u_{dref} 和 u_{dc} 分别为母线电压的参考值和测量值。

(2) 系统波动功率电流经过陷波滤波器将单相全桥引起的电压二倍频功率波动分离,得到单相逆变器的参考电流值 i_{lf} ,并与电网电压的角频率相乘作为单相全桥的电流参考值 i_{vref} ,可分别表示为

$$i_{lf} = i_e \left(A_0 \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{M}s + \omega_n^2} \right) \quad (2)$$

$$i_{vref} = i_{lf} \sin \omega t \quad (3)$$

其中, A_0 为陷波滤波器的增益系数; ω_n 为所需滤除信号的角频率, $\omega_n = 200 \pi$; M 为滤波器品质因素; ω 为电网电压的角频率。

单相全桥并网变换器的电流环采用比例谐振 PR 控制器调节,其占空比可表示为

$$d_{inv} = (i_{vref} - i_v) \left(k_{pr} + \frac{k_{ir}s}{s^2 + \omega_r^2} \right) \quad (4)$$

式(4)中, k_{pr} 为 PR 控制器比例系数, k_{ir} 为 PR 控制器谐振系数, ω_r 为 PR 控制器谐振系数。

(3) 将总功率值减除陷波滤波器的输出值得到二倍频波动功率值,作为超级电容的电流参考值 i_{hf} ,可表示为

$$i_{hf} = i_e - i_{lf} \quad (5)$$

(4) 超级电容作为功率型储能介质,存储能量相对较小,端电压随着存储能量的大小而发生变化。在超级电容电流参考值 i_{scref} 中加入端电压调节控制环路,使得超级电容在响应瞬态输出后,端电压能够恢复到初始值,可有效减少超级电容配置容量,同时可防止连续能量需求下端电压大范围波动造成越限的可能,如式(6)所示:

$$i_{scref} = i_{hf} - \left(k_{pc} + \frac{k_{ic}}{s} \right) (u_{scref} - u_{sc}) \quad (6)$$

式(6)中, k_{pc} 和 k_{ic} 为超级电容端电压控制器的比例和积分系数; u_{scref} 和 u_{sc} 分别为超级电容端电压的参考值和测量值。

(5) 由于系统控制带宽及滤波器参数设计的影响,母线电压存在较小幅值的高频波动特性。电压环路控制难以实现电压波动平抑,引入母线电压波动直接占空比调节控制。直接通过控制超级电容变换器的占空比,平抑母线电压波动,可表示为

$$d_{sc} = \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{scref} - i_{sc}) - k_{pd} (u_{dref} - u_{dc}) \quad (7)$$

式(7)中, k_{pi} 和 k_{ii} 为超级电容电流内环的比例和积分系数, i_{sc} 为超级电容电流测量值, k_{pd} 为母线电压波动直接占空比控制器比例系数。

3 仿真实验与结果分析

根据图 1 所示光伏-超级电容系统结构图,结合图 2 的控制框图,在 MATLAB/simulink 中搭建系统仿真模型,系统直流母线电压为 380 V,交流母线电压为 220 V,模型中直流母线电容值为 1 100 μF 。

表 1 为光伏电池单体参数,对应型号为 Soltech

1STH-215-P。从表 1 光伏电池参数可知:光伏电池单体难以满足系统设计需求,因此采用光伏电池串并联组合,以提高光伏电池组端电压和功率等级,采用 4 并 10 串的结构,光伏系统端电压为 $29\text{ V}\times 10=290\text{ V}$,电流为 $7.35\text{ A}\times 4=29.4\text{ A}$ 。

表 1 光伏电池参数
Fig. 1 Parameters of photovoltaic cell

变 量	名 称	数 值
$P_{\max}$	最大功率	213.15 W
V_{oc}	开路电压	36.3 V
V_{mp}	最大功率点电压	29 V
I_{sc}	短路电流	7.84 A
I_{mp}	最大功率点电流	7.35 A

单相全桥变换器用于连接交直流母线,采用如图 2 所示的电压电流双环控制,其中电压环控制直流母线电压。单相全桥变换器的相关参数如表 2 所示。

超级电容及其变换器的相关参数如表 3 所示,超级电容与单相全桥变换器共用电压环。

表 2 单相全桥变换器参数
Fig. 2 Parameters of single-phase full-bridge converter

变 量	名 称	数 值
f_s	开关频率	10 kHz
$k_{\text{pu}}, k_{\text{iu}}$	电压环系数	0.5, 30
$k_{\text{pr}}, k_{\text{ir}}, \omega_r$	PR 调节器系数	0.1, 20, 100
A_0, M, ω_n	陷波滤波器	1, 0.5, 628

表 3 超级电容参数
Fig. 3 Parameters of supercapacitor

变 量	名 称	数 值
V_{rsc}	额定电压	300 V
V_{isc}	初始电压	220 V
$k_{\text{pe}}, k_{\text{ie}}$	电流环系数	0.1, 400
$k_{\text{pi}}, k_{\text{ii}}$	端电压调节器系数	10, 50
k_{pd}	直接占空比调节系数	5
C_{sc}	额定容量	0.2 F

图 3 为仅加入陷波滤波器分频滤波 (Division Filtering, DF)时直流母线电压波形,系统母线电压恒定,系统维持稳定。对直流母线电压进行局部放大如图 4 所示,可发现母线电压波动幅值较大,且波动幅值随着负荷功率的增加而增加。

图 5 为系统电流波形, i_{G} 为电网电流, i_{v} 为单相全桥变换器电流, i_{l} 为负载电流, i_{sc} 为超级电容电流,在

分频滤波后超级电容仅响应波动功率。

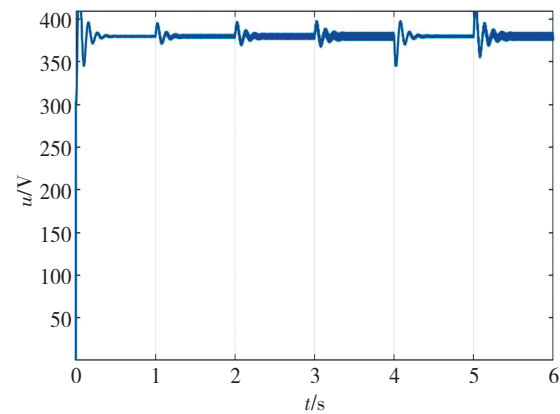


图 3 DF 时直流母线电压

Fig. 3 The DC bus voltage using DF

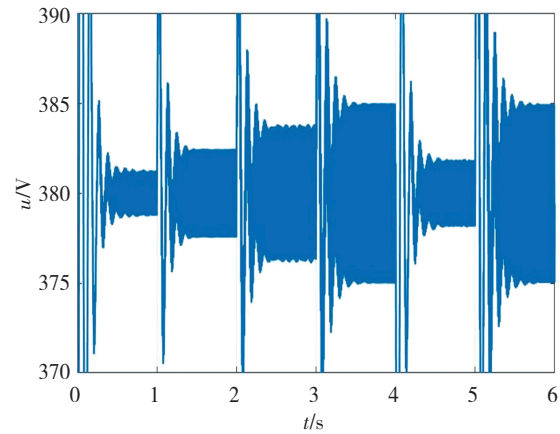


图 4 DF 时直流母线电压局部放大

Fig. 4 The zoomed view of DC bus voltage using DF

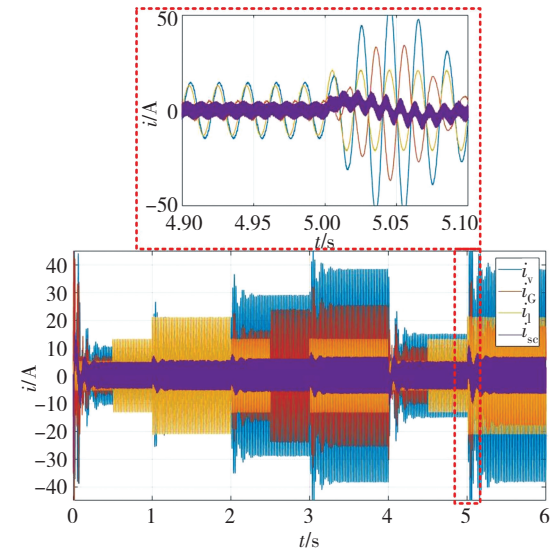


图 5 DF 时系统电流

Fig. 5 The system currents using DF

超级电容的荷电状态 (State of Charge, SOC) 曲线如图 6 所示。超级电容的端电压能够直接反应其荷电状态特征。从图中可发现超级电容端电压随着输出功

率的变化而波动,其端电压存在大范围波动出现越限的可能。在 4 s 时超级电容 SOC 升高,此时负荷需求功率减少,光伏发电功率被分配给超级电容,能量增加。在 5 s 时超级电容 SOC 下降,此时负荷需求功率增加,光伏发电功率难以满足需求,需要从超级电容中吸收功率,则能量减少。

为了减少图 4 中直流母线的波动幅值,加入图 2 中直流母线电压的直接占空比(Direct Duty, DD)控制,此时直流母线电压仿真结果如图 7 所示。电压稳定在 380 V,对直流母线电压进行局部放大,如图 8 所示,可发现图 8 中直流母线电压相对于图 4,电压波动幅值明显减小。

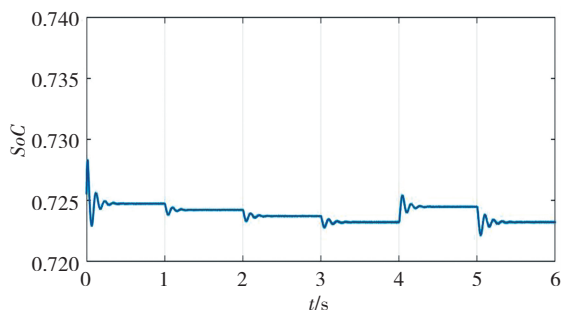


图 6 DF 时超级电容 SOC

Fig. 6 SOC of the supercapacitor using DF

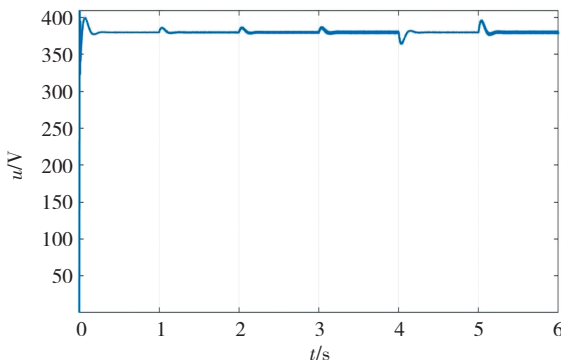


图 7 DF + DD 时直流母线电压

Fig. 7 The DC bus voltage using DF+DD

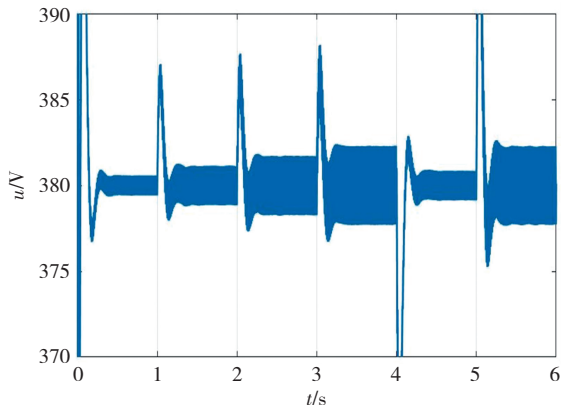


图 8 DF+DD 时直流母线局部电压

Fig. 8 The zoomed view of DC bus voltage using DF+DD

系统电流如图 9 所示,图 9 中超级电容电流存在大范围波动。直流母线电压直接占空比控制将电压波动能量转移到超级电容,由超级电容响应能量波动需求。此时,超级电容的荷电状态曲线如图 10 所示。通过与图 6 对比发现,超级电容的端电压在上升,意味着其存储能量在增加。

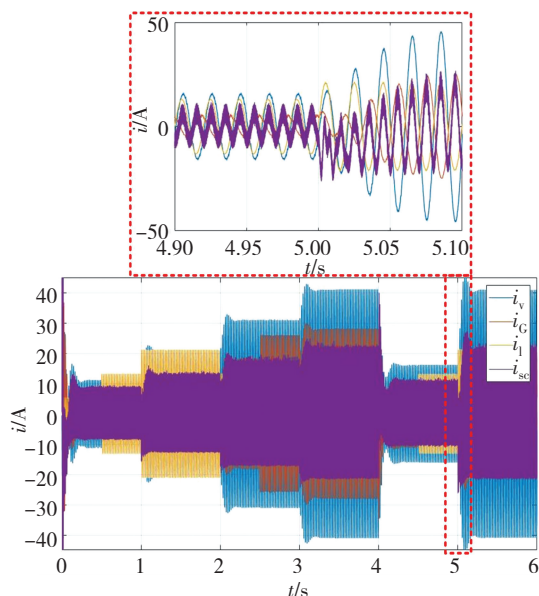


图 9 DF+DD 时系统电流

Fig. 9 The system currents using DF+DD

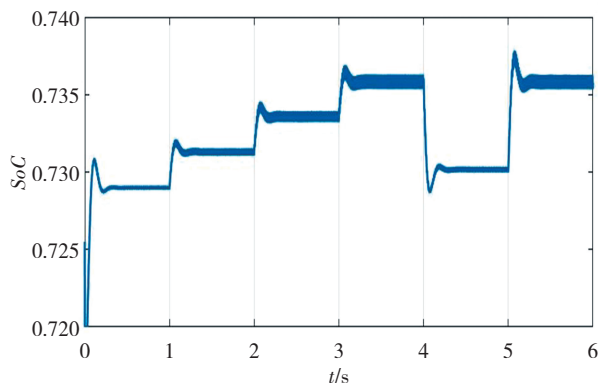


图 10 DF+DD 时超级电容 SOC

Fig. 10 SOC of the supercapacitor using DF+DD

综上所述,直流母线电压直接占空比控制虽然有效减少了直流母线电压的波动幅值,但引起超级电容端电压的大范围波动,存在端电压越限的可能。

为了有效控制超级电容端电压的变化,加入超级电容端电压控制环路,如图 2 所示。此时系统直流母线电压仿真结果如图 11 所示,电压维持在 380 V,系统稳定。此时,对直流母线电压进行局部放大,如图 12 所示,直流母线电压波动幅值与图 8 基本一致,也就意味着超级电容端电压控制环路的加入,并不影响直流母线电压的稳态值。

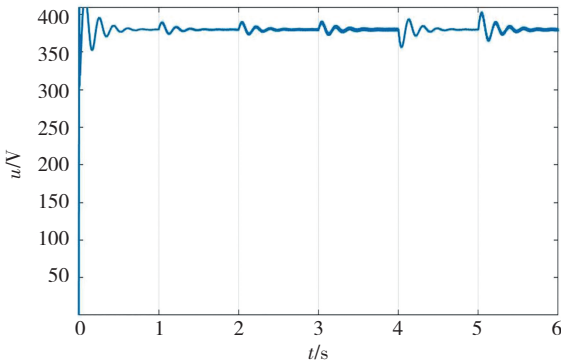


图 11 协同运行时直流母线电压

Fig. 11 The DC bus voltage using the proposed method

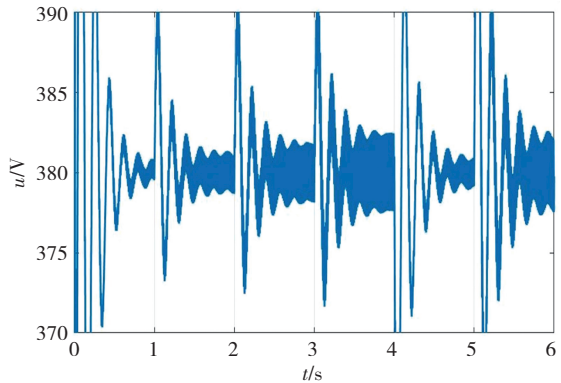


图 12 协同运行时直流母线局部电压

Fig. 12 The zoomed view of DC bus voltage using the proposed method

系统电流如图 13 所示,超级电容电流高频波动与图 9 基本相同。意味着端电压控制环路的加入,并不影响超级电容响应分频滤波后的波动功率响应以及直流母线高频波动的能量需求。

加入超级电容端电压控制环路后,超级电容荷电状态的仿真曲线如图 14 所示。从图 14 中可以发现:超级电容在响应系统瞬态功率波动后恢复至初始稳态值,不仅可以为后续波动储备足够的能量,同时还可以减少超级电容的配置容量,从而节约成本。

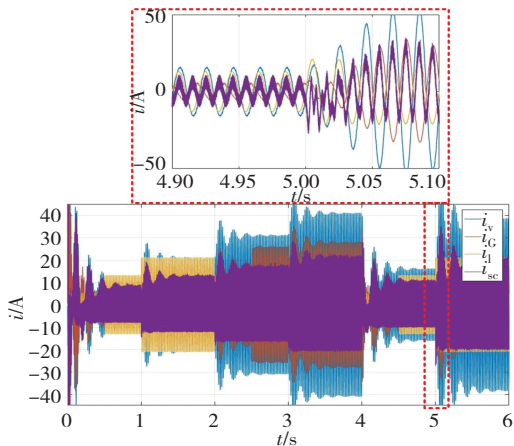


图 13 协同运行时系统电流

Fig. 13 The system currents using the proposed method

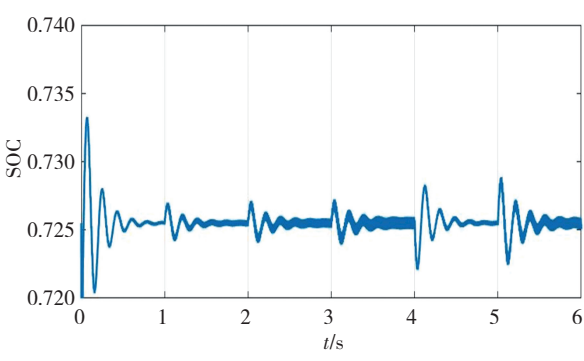


图 14 协同运行时超级电容 SOC

Fig. 14 SOC of the supercapacitor using the proposed method

4 结 论

通过对基于超级电容的光伏并网功率波动平抑控制方法的分析和仿真验证,可得到以下结论:

通过设计陷波滤波器衰减特性频率点,实现对光伏发电功率和单相全桥变换器二倍频波动功率的滤波,有效抑制了波动功率对并网质量的影响;将母线电压高频波动分量引入控制环路,直接调节占空比可有效平抑直流母线电压的高频波动,提高直流母线电压的电能质量;通过超级电容端电压控制环路调节,实现其瞬态响应后的能量恢复,为后续功率需求储备能量。

同时,针对基于超级电容的光伏发电系统仍有如下值得讨论研究的地方:超级电容变换器的高电压增益研究,可充分利用超级电容能量,减少设计成本;系统结构中变换器桥臂的复用研究,可有效提高系统集成度,降低尺寸。

参考文献(References):

[1] 张珍珍, 吕清泉, 张健美. “双碳”目标下分布式光伏发电技术的研究进展及展望[J]. 太阳能, 2023(1): 17-21.
ZHANG Zhen-zhen, LYU Qing-quan, ZHANG Jian-mei. Research progress and prospect of distributed PV power generation technology under the goal of emission peak and carbon neutrality[J]. Solar Energy, 2023(1): 17-21.
[2] 徐少华, 李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 25-33.
XU Shao-hua, LI Jian-lin. Grid-connected/Island operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 25-33.
[3] TANGUTURI J, KEERTHIPATI S. Module power balancing mechanism for a single-phase single-stage grid-connected photovoltaic cascaded H-bridge inverter[J]. IEEE Transactions

- on Power Electronics, 2024, 39(2): 2777-2786.
- [4] 何飞帆, 高文根, 於跃. 基于模糊控制的光伏微电网复合储能控制策略优化研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 56-63.
- HE Fei-fan, GAO Wen-gen, YU Yue. Research on the composite energy storage control strategy optimization of fuzzy control based photovoltaic microgrid[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(3): 56-63.
- [5] 温烨婷, 戴瑜兴, 毕大强, 等. 一种电网友好型光储分布式电源控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 464-476.
- WEN Ye-ting, DAI Yu-xing, BI Da-qiang, et al. A grid friendly PV/BESS distributed generation control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 464-476.
- [6] 刘宿城, 甘洋洋, 刘晓东, 等. 超级电容接口双向 DC-DC 变换器的电压快恢复控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5496-5508.
- LIU Su-cheng, GAN Yang-yang, LIU Xiao-dong, et al. Fast voltage recovery control strategy for supercapacitor interfacing bidirectional DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5496-5508.
- [7] 陈兆岭, 张强, 邱殿成, 等. 超级电容储能的光伏充电系统双模控制研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(4): 82-85.
- CHEN Zhao-ling, ZHANG Qiang, QIU Dian-cheng, et al. Dual mode control of photovoltaic charging system for supercapacitor energy storage[J]. Power Electronics, 2019, 53(4): 82-85.
- [8] 王懂, 廖圣桃, 漆敏, 等. 光伏电池-超级电容器件最大功率跟踪控制[J]. 电力电子技术, 2020, 54(6): 108-111, 140.
- WANG Dong, LIAO Sheng-tao, QI Min, et al. Maximum power tracking control of photovoltaic cell supercapacitor device[J]. Power Electronics, 2020, 54(6): 108-111, 140.
- [9] 郑新昊, 祝龙记. 光伏直流微电网超级电容储能控制策略研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(4): 497-501.
- ZHENG Xin-hao, ZHU Long-ji. Research on control strategy of super capacitor energy storage in photovoltaic DC microgrid[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(4): 497-501.
- [10] CHEN Y M, WU H C, CHEN Y C. DC bus regulation strategy for grid-connected PV power generation system[C]// 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. Singapore, 2008: 437-442.
- [11] 林智乐, 何良宗, 周鸿彦. 基于有源负电容的电压源型逆变器直流母线二次功率脉动的抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7772-7782.
- LIN Zhi-le, HE Liang-zong, ZHOU Hong-yan. Suppressing secondary power pulsation method for DC bus of voltage source inverter based on active negative capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7772-7782.
- [12] SHEN Y, ZAKZEWSKI D, HASNAIN A, et al. Sensorless control for DC-parallel active power decoupling in PV microinverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14628-14637.
- [13] ZHOU H, HE L, LU F. Impedance editing based second harmonic current reduction for new energy access system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2638-2649.
- [14] RYU T, CHOI U. Discontinuous PWM strategy for reliability and efficiency improvements of single-phase five-level T-type inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2567-2577.
- [15] JAIN R K, BARRY V R, GADIRAJU H K V. An effective control strategy for single-phase single-stage PV grid-tied inverter under abnormal grid conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(2): 1249-1260.
- [16] 陈瑞成, 苗加振, 胡聰, 等. 单相光伏逆变器直流母线电压二次波动对系统影响的分析与抑制[J]. 电测与仪表, 2017, 54(10): 7-13, 20.
- CHEN Rui-cheng, MIAO Jia-zhen, HU Cong, et al. Analysis and suppression on effect of secondary voltage disturbances of DC bus for single-phase PV inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(10): 7-13, 20.
- [17] 张鸿博, 蔡晓峰. 直流电压含二次纹波条件下并网逆变器输出谐波抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 119-128.
- ZHANG Hong-bo, CAI Xiao-feng. Output harmonic suppression of a grid-connected inverter with secondary ripple in DC voltage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 119-128.
- [18] 王飞, 余世杰, 苏建徽, 等. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005(5): 72-74, 91.
- WANG Fei, YU Shi-jie, SU Jian-hui, et al. Research on photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005(5): 72-74, 91.

责任编辑:李翠薇