DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0487 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-14

一种光储复合变流器拓扑及其电网电压控制策略

武登科[1,2],姜文东[3],熊鸿韬[3],李培[3],庄凯勋[1,2],孙建军[1,2]

(1. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072; 2. 综合能源电力装备及系统安全湖北省重点实验室,湖北 武汉 430072;
3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014)

摘要: 近年来,大量新能源接入电网,其输出功率的随机性与波动性,在配电网中引发了严重的电压质量问题。电力电子变流设备因其补偿精度高,控制灵活等特点,已成为电压质量优化提升领域的研究热点。本文提出了一种新型的光储复合变流器拓扑及其电网电压支撑控制策略。所提拓扑由原边侧复合交错并联双向Buck/Boost电路的双有源桥电路与三相并网逆变电路拼接而成,其三端口可分别实现光伏阵列、蓄电池储能以及电网的接入,具有六种工作模式实现灵活的功率调度。所提电网电压支撑控制策略基于PCC点的电压反馈,在抑制PCC点电压波动的同时,具有补偿电流最小的效果。最后通过仿真分析验证了所提拓扑与控制策略的可行性。

关键词: 双有源桥;拓扑复用;电压质量提升;新能源接入

中图分类号: TM 457 **文献标志码:** A

A topology of photovoltaic energy storage composite inverter and its voltage control strategy for power grid

WU DengKe[1,2], JIANG WenDong[3], XIONG HongTao[3], LI Pei[3], CHUANG Kaihsun[1,2], SUN JianJun[1,2]

(1. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;
2. Hubei Key Laboratory of Power Equipment and System Security for Integrated Energy, Wuhan 430072, China;
3. Electric Power Scientific Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: The randomness and fluctuation of the output power of a large number of new energy sources connected to the power grid can cause serious voltage quality problems in the distribution network. In recent years, power electronic converters have become a research hotspot in the field of voltage quality optimization and improvement due to their high compensation accuracy and flexible control. This article proposes a novel topology and voltage support control strategy for a photovoltaic energy storage composite inverter. The proposed topology is composed of a dual active bridge circuit of a primary side composite interleaved parallel bidirectional Buck/Boost circuit and a three-phase grid connected inverter circuit. Its three ports can respectively realize the connection of photovoltaic arrays, battery energy storage, and power grid, and have six working modes to achieve flexible power scheduling. The proposed voltage support control strategy is based on voltage feedback at the PCC point, which has the effect of minimizing compensation current while suppressing voltage

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 武登科(2002-),男,学士,主要从事电力电子拓扑结构与控制研究,E-mail: 1239390286@qq.com。

通信作者: 孙建军(1975-),男,教授,博士,主要从事电力电子设备并网研究,E-mail: jjsun@whu.edu.cn。

基金项目: 新型电力系统全场景供电电压质量溯源提升技术研究与应用(编号:B311DS23000L)。



本文引用格式: 武登科,姜文东,熊鸿韬,等.一种光储复合变流器拓扑及其电网电压控制策略[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-14.

Citation: WU DengKe, JIANG WenDong, XIONG HongTao, et al. A topology of photovoltaic energy storage composite inverter and its voltage control strategy for power grid[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-14.

fluctuations at the PCC point. Finally, the feasibility of the proposed topology and control strategy was verified through simulation analysis.

Key words: Double active bridge; Topological multiplexing; Voltage quality enhancement; renewable energy integration

在“双碳”目标的要求下,中国分布式新能源发电总量呈现上升趋势,配电网也向以分布式能源发电为主的新型配电系统发展[1]。分布式新能源发电接入配电网可以实现能量的就地平衡,有效降低因为远距离输电所带来的损耗[3]。然而分布式新能源发电受自然因素影响极大,其输出功率的随机性、波动性与间歇性,会在配电网中产生严重的电压质量问题,如电压越限、电压波动等[5]。这些电压质量问题不但会影响配电网中电压敏感设备及仪器的正常应用[6],同时也对整个系统的安全稳定运行提出了挑战[7]。因此如何提升大量新能源接入下的配电网供电电压质量具有重要研究意义。

文献[8]采用改变有载变压器变比调压的方式来调节分布式发电接入引起的电压波动,其调节方法较为单一,缺乏灵活性,且该方法仅适用于无功裕度较为充足的系统。文献[9]提出了并网点电抗器补偿方案,但存在投切瞬间暂态冲击较大、响应速度慢及可能引起系统谐振等问题。文献[10]通过对配电网内的有载调压变压器以及无功补偿装置进行优化配置实现对电压波动的抑制,但不同无功补偿装置的调节能力以及响应时间存在差异,其协调控制在实现上较为困难。文献[11]和[12]采用在配电网中安装静止同步补偿器的方法控制配电网的电压,其电压控制效果受有功功率影响较大,且经济性不高。

分布式电源可以主动参与电压支撑[13],通过快速的功率调节,实现对电网公共连接点(point of common coupling, PCC)电压波动的抑制[14]。文献[16]提出一种考虑分布式光伏多运行状态调节能力与传统无功调节设备相协调的配电网多时间尺度无功电压协调控制方案,改善因新能源出力波动带来的电压偏差问题。文献[17]以配置储能装置的分布式发电配电网系统为基础,提出了一种逆变器有功/无功综合控制策略,有效地避免了电压越限现象的产生。文献[18]提出一种基于模型预测控制的电压优化控制方案,以预测电压与额定电压之间偏差最小为控制目标,实现了控制成本最低的协调电压控制策略。

分布式发电系统中,当光伏阵列与储能电池等发电单元同时接入系统工作时,需要使用多个双端口DC/DC变换器,大大增加了成本。多端口DC/DC变换器可以将多个双端口DC/DC变换器的功能整合到一个拓扑结构中,减少开关器件的数量,有效地降低系统成本,已成为能源变换领域的研究热点。文献在[19]双输入Boost电路中增加充电回路实现三端口,但电路只能分时供电,能量利用率低。文献[20]将三个有源全桥结构的电压源通过三绕组变压器连接构成三端口变换器,端口之间能量可双向流动,但整体功率器件仍较多,同时控制上较为繁琐。文献[21]将交错并联双向Buck/Boost电路与全桥LLC电路结合起来,复用四个开关管,实现了第三个端口的引入。但该拓扑无法实现输出侧到储能的能量传递。

本文基于拓扑复用的思想,提出了一种具备电压支撑能力的复合变流器拓扑,在双有源桥(dual active bridge, DAB)电路的原边侧复合一个交错并联双向Buck/Boost电路,实现了储能端口的接入。相较于传统的组合式光储变流器,本文所提拓扑具有器件少、效率高等优势。基于所提拓扑,本文提出了一种基于补偿电流最小的功率协同调节策略,通过测量得到的PCC点电压偏差值,给出有功功率、无功功率补偿指令,再将其转化为有功电流、无功电流参考值作用于变流器的控制系统。所提变流器拓扑与功率调节策略在对PCC点电压进行控制的同时,输出的补偿电流最小,有利于有功功率向电网的传输,提高了工作在补偿状态下的并网变流器输出功率因数。最后,通过仿真验证了本文所提拓扑具有较好的电压治理与电压质量提升的能力。

1 光储复合多端口变流器拓扑及其控制

1.1 拓扑结构与工作原理

为实现对并网点电压的调控,所提光储复合多端口变流器需要同时完成交流电网、光伏电池及储能装置的功率调控。以DAB电路为基础,在其原边侧复合一个交错并联双向Buck/Boost电路,引入储能端口;在其副边侧直流端接入三相桥式电路,引

入并网端口，从而形成了如图1所示的新型光储复合多端口变流器拓扑。

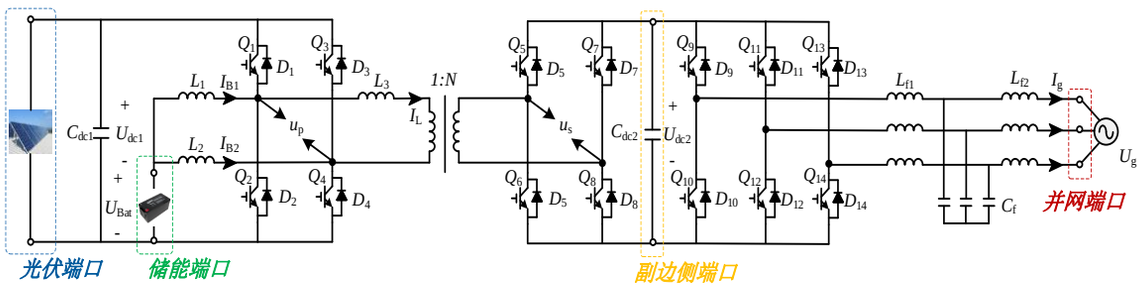


图1 具备电压支撑的复合变流器拓扑结构

Fig.1 Composite converter topology with voltage support

在图1中，C_{dc1}为光伏端口滤波电容，U_{dc1}为光伏阵列直流电压；L_1、L_2为储能端口滤波电感，U_{Bat}为蓄电池直流电压；L_3为辅助电感，其上流通I_L为高频电流；u_p为双有源桥原边侧输出电压，u_s为双有源桥副边侧输出电压；C_{dc2}为副边侧端口滤波电容，U_{dc2}为副边侧端口电压；LCL型滤波器由L_{f1}、L_{f2}以及C_f组成，其中L_{f1}为逆变器侧滤波电感，L_{f2}为电网侧滤波电感，C_f为并网滤波电容，I_g为入网电流，U_g为电网电压。

所提拓扑由两种功率回路构成。DAB电路副边侧端口通过三相桥式电路与并网端口一起构成如图2(a)所示的AC/DC功率回路，光伏端口通过DAB电路与副边侧端口构成了如图2(b)所示的第一种DC/DC功率回路，即DAB回路；光伏端口通过交错并联双向Buck/Boost电路与储能端口构成了如图2(c)所示的第二种DC/DC功率回路，即Buck/Boost回路。下文基于这两种功率回路对所提拓扑的工作原理进行介绍。

(1)AC/DC功率回路

如图2(a)所示的AC/DC功率回路由三相LCL型并网逆变电路组成。其中u_a、u_b、u_c为逆变器输出电压，u_{ga}、u_{gb}、u_{gc}为电网电压，I_{Labc}为逆变器输出电流。工频稳态下，电容支路可以视为断路，流经两个滤波电感的电流近似相等，则dq旋转坐标系下交流回路方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_d - u_{gd} = (L_{f1} + L_{f2})\dfrac{\mathrm{d}i_{Ld}}{\mathrm{d}t} - \omega(L_{f2} + L_{f2})i_{Lq} \\ u_q - u_{gq} = (L_{f1} + L_{f2})\dfrac{\mathrm{d}i_{Lq}}{\mathrm{d}t} + \omega(L_{f2} + L_{f2})i_{Ld} \end{cases} \tag{1}$$

式中：u_d、u_q为dq坐标系下逆变器输出电压分量；u_{gd}、u_{gq}为dq坐标系下电网电压分量；I_{Ld}、I_{Lq}为dq坐标系下逆变器输出电流分量；ω为角频率。

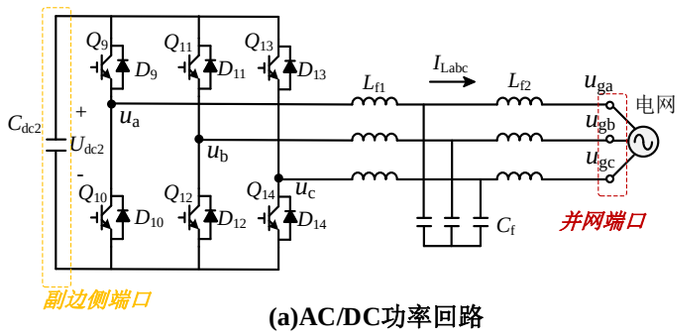
dq坐标系下AC/DC功率回路的传输功率表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} P = \dfrac{3}{2}u_{gd}i_{Ld} + \dfrac{3}{2}u_{gq}i_{Lq} \\ Q = \dfrac{3}{2}u_{gq}i_{Ld} - \dfrac{3}{2}u_{gd}i_{Lq} \end{cases} \tag{2}$$

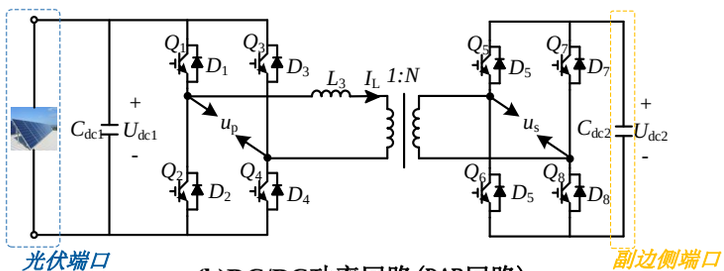
(2)DC/DC功率回路

如图2(b)所示，DAB回路采用双有源桥拓扑结构。该功率回路采用双移相调制，其原副边侧的全桥电路均工作于逆变模式。高频变压器的两端输出u_p，u_s为高频三电平阶梯波，通过改变阶梯波之间的相位差，可对其光伏端口与副边侧端口间的功率传输方向与大小进行调节。忽略高频变压器的内阻与漏感，其等效计算电路如图3所示。稳态条件下u_p、u_s和I_L的单个开关周期的波形如图3颜色框内所示。

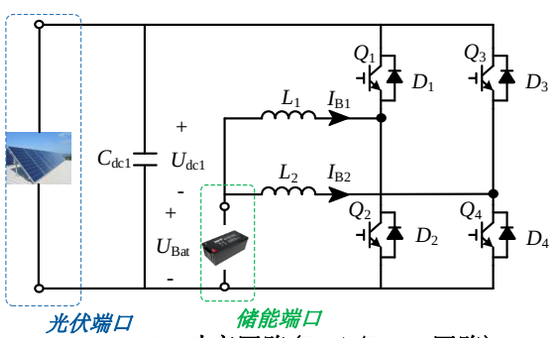
采用分段解析的方法求取DAB电路传输功率的表达式。稳态条件下，DAB电路的电压电流在单个开关周期内均具有对称性，因此只需计算半个开关周期的传输功率。设D_1为内移相比，D_2为外移相比，f_c为开关频率，则半个开关周期内电感电流的表达式如式(3)所示。



(a)AC/DC功率回路



(b)DC/DC功率回路(DAB回路)



(c)DC/DC功率回路(Buck/Boost回路)

图2 光储复合变流器拓扑功率回路示意图

Fig.2 Schematic diagram of topological power circuit

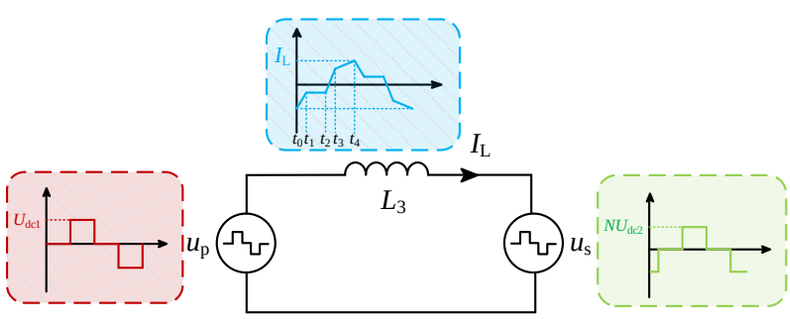


图3 DAB等效计算电路示意图

Fig.3 DAB equivalent calculation circuit diagram

$$I_L=\begin{cases}\dfrac{NU_{dc2}}{L_3}(t-t_0)+\dfrac{(D_1-1)U_{dc1}+(1-D_1-2D_2)NU_{dc2}}{4f_cL_3} & (\mathrm{t_0}\sim\mathrm{t_1})\\ \dfrac{(D_1-1)U_{dc1}+(1-D_1)NU_{dc2}}{4f_cL_3} & (\mathrm{t_1}\sim\mathrm{t_2})\\ \dfrac{U_{dc1}}{L_3}(t-t_2)+\dfrac{(D_1-1)U_{dc1}+(1-D_1)NU_{dc2}}{4f_cL_3} & (\mathrm{t_2}\sim\mathrm{t_3})\\ \dfrac{U_{dc1}-NU_{dc2}}{L_3}(t-t_3)+\dfrac{(D_1+2D_2-1)U_{dc1}+(1-D_1)NU_{dc2}}{4f_cL_3} & (\mathrm{t_3}\sim\mathrm{t_4})\end{cases} \tag{3}$$

双移相调制下,DAB电路的传输功率表达式如式(4)所示。

$$P_{DC1}=\begin{cases}\dfrac{NU_{dc1}U_{dc2}}{8f_cL_3}(2-2D_2)(1+D_2-2D_1) & D_2>D_1,D_1+D_2>1\\ \dfrac{NU_{dc1}U_{dc2}}{8f_cL_3}(-2D_1^2-4D_2^2+4D_2) & D_2>D_1,D_1+D_2\leqslant 1\\ \dfrac{NU_{dc1}U_{dc2}}{8f_cL_3}(4D_2-4D_1D_2-2D_2^2) & D_2\leqslant D_1,D_1+D_2<1\\ \dfrac{NU_{dc1}U_{dc2}}{8f_cL_3}(2-2D_1^2) & D_2\leqslant D_1,D_1+D_2\geqslant 1\end{cases} \tag{4}$$

如图2(c)所示的Buck/Boost回路由交错并联双向Buck/Boost电路组成。两个Buck/Boost电路之间的载波相位互差180°,同一桥臂上下开关管互补导通,不同桥臂间处于交叉位置的开关管同时导通。以开关管Q_1、Q_3的占空比D<0.5为例,交错并联双向Buck/Boost电路的等效计算电路的示意图如图4所示。其中I_{Bat}为蓄电池输出电流,I_{B1}、I_{B2}分别为流经储能端口滤波电感L_1、L_2的电流。

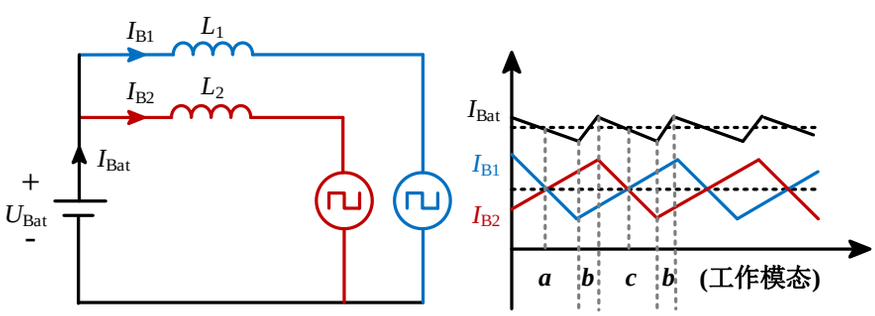


图4 交错并联双向Buck/Boost等效计算电路示意图

Fig.4 Schematic diagram of interleaved parallel bidirectional Buck/Boost equivalent calculation circuit

交错并联双向Buck/Boost电路的传输功率表达式如式(5)所示

$$P_{DC2}=U_{Bat}I_{Bat} \tag{5}$$

由图4可得到等效计算电路在a、b、c工作模态下的状态方程如式(6)所示。

$$\begin{cases}L\dfrac{\mathrm{d}I_{B1}}{\mathrm{d}t}=U_{Bat}-U_{dc1}\\ L\dfrac{\mathrm{d}I_{B2}}{\mathrm{d}t}=U_{Bat}\\ L\dfrac{\mathrm{d}I_{Bat}}{\mathrm{d}t}=2U_{Bat}-U_{dc1}\end{cases}(a),\quad\begin{cases}L\dfrac{\mathrm{d}I_{B1}}{\mathrm{d}t}=U_{Bat}\\ L\dfrac{\mathrm{d}I_{B2}}{\mathrm{d}t}=U_{Bat}\\ L\dfrac{\mathrm{d}I_{Bat}}{\mathrm{d}t}=2U_{Bat}\end{cases}(b),\quad\begin{cases}L\dfrac{\mathrm{d}I_{B1}}{\mathrm{d}t}=U_{Bat}\\ L\dfrac{\mathrm{d}I_{B2}}{\mathrm{d}t}=U_{Bat}-U_{dc1}\\ L\dfrac{\mathrm{d}I_{Bat}}{\mathrm{d}t}=2U_{Bat}-U_{dc1}\end{cases}(c) \tag{6}$$

由式(6),可以求得输出电流的电流纹波值,结果如式(7)所示。

$$\begin{cases}\Delta I_{B1}=\dfrac{D(U_{dc1}-U_{Bat})}{2f_c}\\ \Delta I_{B2}=\dfrac{D(U_{dc1}-U_{Bat})}{2f_c}\\ \Delta I_{Bat}=\dfrac{D(U_{dc1}-2U_{Bat})}{2f_c}\end{cases}\tag{7}$$

由式(7)可得$\Delta I_{B1}=\Delta I_{B2}>\Delta I_{Bat}$,可见相较于单个Buck/Boost电路而言,交错并联双向Buck/Boost电路具有更小的电流纹波,提高了电能输出质量。

1.2 工作模式分析

具备电压支撑的复合变流器拓扑所具有的两种功率回路均具备功率双向流通的能力,因此采用合适的控制策略可以实现各端口两两之间灵活的能量交互。按照端口功率的流动方向可分为三种工作模式:单输入单输出模式(single input single output,SISO)、双输入单输出模式(dual input single output,DISO)与单输入双输出模式(single input dual output,SIDO)。根据输入源与输出源可进一步细分为6种能量流动模态,如图5所示。

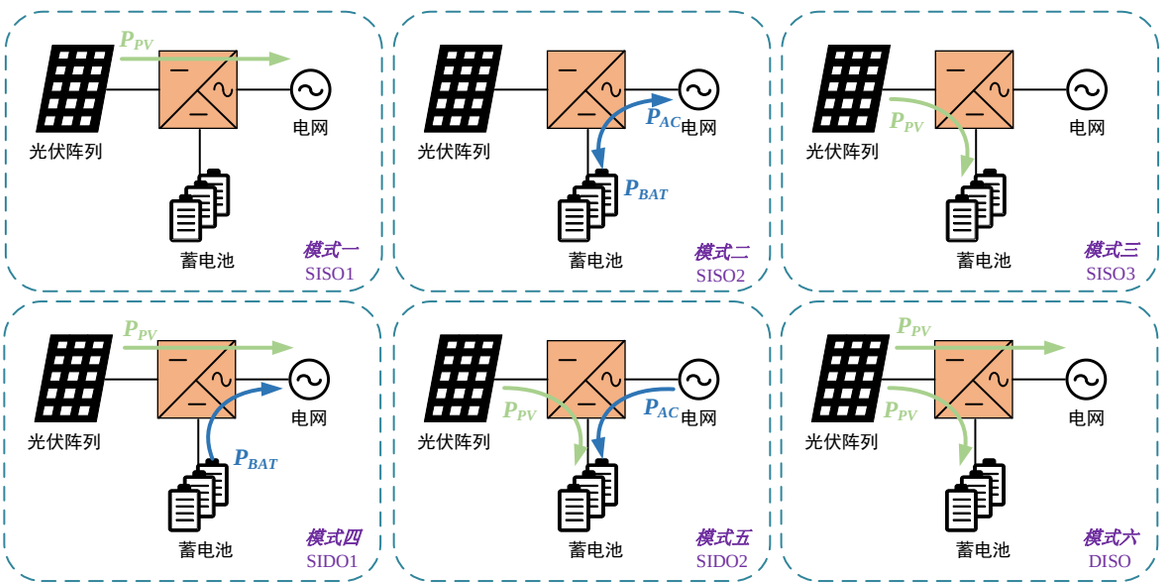


图5 拓扑工作模式示意图

Fig.5 Topological working mode diagram

各工作模式下的功率输出状态见表1,其中P_{AC}代表电网功率,P_{PV}代表光伏功率,P_{BAT}代表蓄电池功率。当功率为正时,相应端口输出有功功率;当功率为负时,相应端口吸收有功功率;零值则代表不输出吸收有功功率。

表1 各工作模式功率输出表

Table 1 Power output table of each working mode

工作模式	P_{PV}	P_{BAT}	P_{AC}	P_{in}	P_{out}
SISO1	$P_{PV}>0$	$P_{BAT}=0$	$P_{AC}<0$	P_{AC}	P_{PV}
SISO2	$P_{PV}=0$	$P_{BAT}>0$或$P_{BAT}<0$	$P_{AC}<0$或$P_{AC}>0$	P_{AC}或P_{BAT}	P_{BAT}或P_{AC}
SISO3	$P_{PV}>0$	$P_{BAT}<0$	$P_{AC}=0$	P_{BAT}	P_{PV}
SIDO1	$P_{PV}>0$	$P_{BAT}>0$	$P_{AC}<0$	P_{AC}	P_{PV},P_{BAT}
SIDO2	$P_{PV}>0$	$P_{BAT}<0$	$P_{AC}>0$	P_{BAT}	P_{PV},P_{AC}
DISO	$P_{PV}>0$	$P_{BAT}<0$	$P_{AC}<0$	P_{AC},P_{BAT}	P_{PV}

1.3 拓扑控制策略

具备电压支撑的复合变流器拓扑的控制策略按照功率回路可分为:DC/DC功率回路控制策略与AC/DC功率回路控制策略,相应的控制框图如图6、7所示。

(1)DC/DC功率回路控制

图6给出了DC/DC功率回路控制框图,该控制策略以光伏最大功率跟踪与蓄电池输出电流作为控制目标,通过每个控制周期内采样的光伏端口电压以及蓄电池滤波电感电流就可以计算出期望的

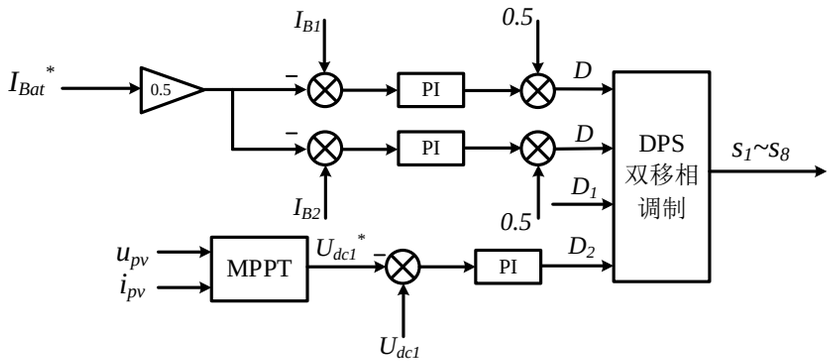


图6 DC/DC功率回路控制框图

Fig.6 DC/DC power circuit control diagram

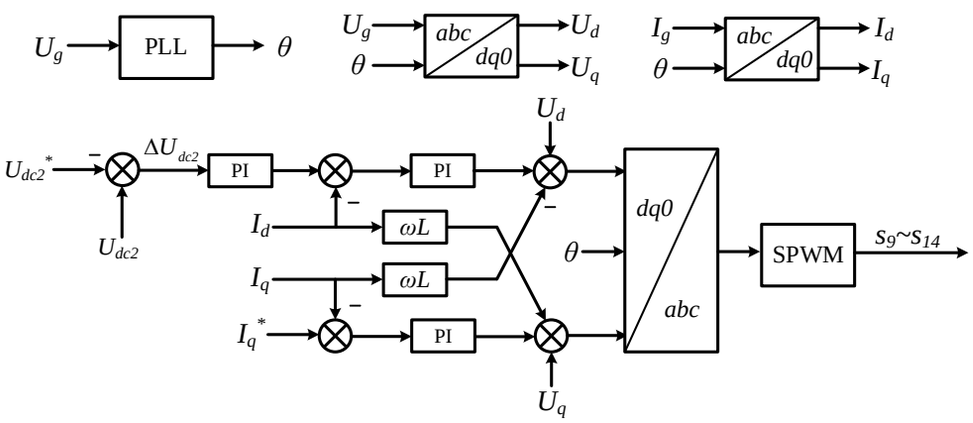


图7 AC/DC功率回路控制框图

Fig.7 AC/DC power circuit control diagram

占空比D以及外移相比D_2。由于交错并联双向Buck/Boost电路两个桥臂载波之间互差180°，而DAB的原边侧与其进行了拓扑复用，所以内移相比D_1的值为1。

光伏最大功率跟踪通过电导增量法得到光伏阵列的最大工作点，并将最大工作点的电压输出作为光伏端口的直压参考。光伏端口的直压偏差经过比例积分（proportional integral，PI）控制器，输出外移相比D_2，其表达式如式（8）所示。

$$D_2=(k_{\mathrm{pvp}}+\frac{k_{\mathrm{pvi}}}{s})(U_{dc1}-U_{dc1}^*) \tag{8}$$

式中：k_{pvp}和k_{pvi}为光伏端口直流电压的PI参数。

蓄电池输出电流的参考值由外部指令给定，平均分配到两个Buck/Boost电路，作为流经滤波电感L_1、L_2电流I_{B1}、I_{B2}的参考值，相应的电流偏差值经过PI控制器后输出交错并联双向Buck/Boost电路两桥臂的占空比D。稳态条件下，两桥臂占空比相同，此处以I_{B1}所在桥臂为例给出D的表达式如式（9）所示。

$$D=0.5+(k_{\mathrm{batp}}+\frac{k_{\mathrm{bati}}}{s})(I_{B1}-0.5I_{Bat}^*) \tag{9}$$

式中：k_{batp}和k_{bati}为光伏端口直流电压的PI参数。

得到占空比D、内移相比D_1、外移相比D_2的期望值后，通过双移相调制就可以得到功率管Q_1~Q_8的开关信号。

（2）AC/DC功率回路控制

图7给出了AC/DC功率回路控制框图，采用经典的电压电流双闭环控制策略。电压环控制用于维持副边侧端口直流电压的稳定，将直流电压的测量值与指令值进行比较，经由PI控制器得到d轴电流的参考值I_{d}^*，其表达式如式（10）所示。

$$I_d^*=(k_{\mathrm{vp}}+\frac{k_{\mathrm{vi}}}{s})(U_{dc2}-U_{dc2}^*) \tag{10}$$

式中：k_{vp}和k_{vi}为副边侧端口直流电压的PI参数。

q轴电流的参考值由外部指令给定，与d轴参考电流一起经过电流环控制后输出dq坐标系下的调制波，其表达式如式（11）所示。

$$\begin{cases} U_d^* = (k_{Idv} + \dfrac{k_{Idi}}{s})(I_d^* - I_d) + U_d - \omega(L_{f1} + L_{f2})I_q \\ U_q^* = (k_{Iqv} + \dfrac{k_{Iqi}}{s})(I_q^* - I_q) + U_q + \omega(L_{f1} + L_{f2})I_d \end{cases} \tag{11}$$

dq坐标系下的调制波经过坐标变换得到三相静止坐标系下的三相调制波,经过SPWM调制后得到功率管Q_9~Q_{14}的开关信号。

2 基于光储复合多端口变流器的电网电压支撑策略

2.1 PCC点电压调节原理分析

配电系统并网等效电路如图8所示。其中P、Q分别为从大电网流出的有功功率和无功功率,U_{pcc}和U_g分别为PCC点电压和大电网电压,R_L和X_L分别为传输线上的线路电阻与线路电抗,I_L为线路电流。

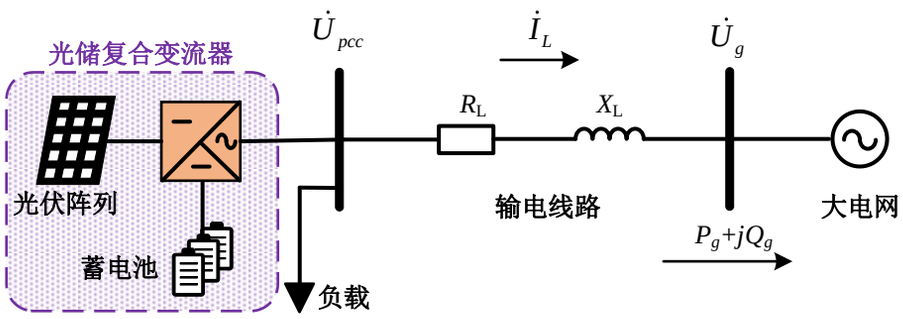


图8 配电系统并网等效电路图

Fig.8 Equivalent circuit diagram of the distribution system connected to the grid

当分布式电源受环境影响出力出现波动,或配电网内部负载投切时,配电网与大电网之间的功率潮流发生改变。由于输电线路的阻抗不可忽略,大电网作为无穷大系统,其电压幅值认为恒定不变,因此PCC点会存在电压波动的问题,电压幅值变化量的具体表达式如式(12)所示。

$$\Delta U = U_{pcc} - U_g = -\frac{PR_L + QX_L}{U_g} \tag{12}$$

如式(12),可通过调节并网变流器的输出的有功功率和无功功率控制电压波动幅度。以长度为1km型号为LJ-16(R_L=1.98Ω, X_L=0.358Ω, Z_L=R_L+jX_L)的架空线路为例,绘制PCC点电压随有功功率、无功功率变化趋势,所得结果如图9所示。

由图9可知,并网变流器注入/吸收有功、无功功率可以实现PCC点电压的抬升和降低。图9曲线(1)、(2)分别反映了电压幅值偏差对于有功功率和无功功率变化的灵敏度,低压配电网中,有功功率对于PCC点电压幅值的影响比无功功率的影响更大。对于给定的电压幅值变化量ΔU=5%U_g,相应的有功-无功功率曲线如图9曲线(3)所示。可见对于同一电压幅值变化量,存在多种有功、无功组合可以实现电压幅值补偿的目标,为此需要采取一定的策略,来选出最为合适的有功、无功组合。

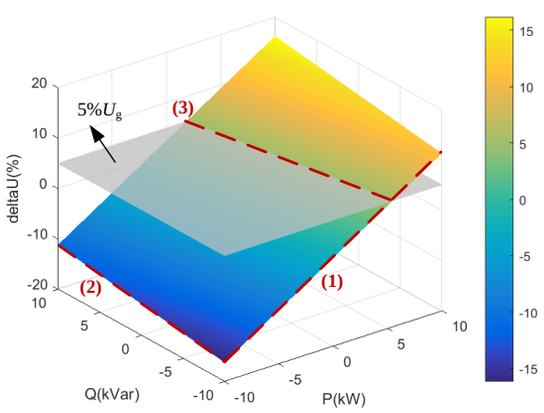


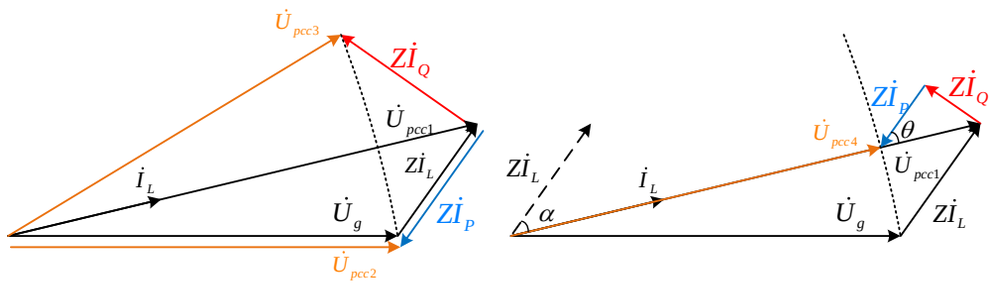
图9 PCC点电压随有功-无功变化趋势图

Fig.9 Trend chart of PCC point voltage with active reactive power variation

2.2 基于补偿电流最小的功率协同调节策略

为了合理分配有功功率和无功功率的补偿容量,充分提升光储复合变流器拓扑的性能,本文提出了一种基于补偿电流最小的功率协同调节策略,以输出最小补偿电流实现PCC点电压控制为目标,协同调节光储变流器有功、无功功率补偿分量。

图10给出了不同调节策略下PCC点电压相量图,其中$\dot{U}_g$为电网电压相量,$\dot{U}_{pcc1}$为功率补偿前PCC点电压相量,$\dot{I}_L$为线路电流相量,Z为输电线路阻抗。$\dot{I}_P$、$\dot{I}_Q$分别为并网变流器补偿电流有功分量、



(a)有功/无功功率调节 **(b)功率协同调节**

图 10 不同调节策略下 PCC 点电压相量图

Fig.10 PCC point voltage phasor diagram under different adjustment strategies

无功分量。$\dot{U}_{pcc2}$、$\dot{U}_{pcc3}$和$\dot{U}_{pcc4}$为PCC点电压经过补偿后的新稳态值。正常工作状态下，并网变流器仅向电网输送有功功率，因此$\dot{U}_{pcc1}$与$\dot{I}_L$同相位。

图10(a)中当仅采用有功功率进行调节时，并网变流器吸收有功电流，线路上传输的有功功率减少，理论上新的PCC点稳态电压$\dot{U}_{pcc2}$在幅值和相位上均可以与$\dot{U}_g$相等。但是这种调节方式不利于有功功率向电网的传输。对于变流器而言，吸收有功电流意味着将多余的有功功率存入储能装置或减小光伏的出力，前者对储能的容量提出较高的要求，后者不利于新能源的消纳。当仅采用无功功率进行调节时，并网变流器吸收无功电流，理论上新的PCC点稳态电压$\dot{U}_{pcc3}$仅能在幅值上与相等，而相位上存在较大偏差。对于变流器而言，仅采用无功功率控制会使得PCC点的功率因数降低。

图10(b)给出了采用基于补偿电流最小的功率协同调节策略时，PCC点电压相量图。其中，α为输电线路阻抗角；θ为补偿电流的功率因数角。通过分配有功功率与无功功率分量，实现新的PCC点稳态电压$\dot{U}_{pcc4}$幅值补偿的同时，补偿电流最小的效果。补偿电流的有功无功分量满足关系式(13)。

$$\frac{I_Q}{I_P}=\tan\theta \tag{13}$$

根据电压相量的几何关系，当补偿电流功率因数角等于输电线路阻抗角时，逆变器输出的补偿电流为最小补偿电流。则式(13)可被修正为式(14)。

$$\frac{I_Q}{I_P}=\tan\theta=\tan\alpha=\frac{X_L}{R_L} \tag{14}$$

联立式(12)与式(14)可以得到有功-电压下垂控制方程以及无功-电压下垂控制方程，其表达式如式(15)所示。

$$\begin{cases} P^*=P_0-\dfrac{U_gR_L}{R_L^2+X_L^2}(U_{pcc}-U_g) \\ Q^*=Q_0-\dfrac{U_gX_L}{R_L^2+X_L^2}(U_{pcc}-U_g) \end{cases} \tag{15}$$

式中：P_0和Q_0分别为PCC点电压无波动时，线路上流经的有功功率、无功功率；P^*和Q^*分别为基于PCC点电压反馈功率协同调节策略下有功功率、无功功率指令值。

为了实现光储复合多端口变流器对PCC点电压的控制，需要将基于最小补偿电流的功率协同调节策略所得到的有功功率、无功功率指令值，转化为拓扑控制系统中有功电流、无功电流的参考值。其中有功功率通过储能部分来调控，无功功率通过并网逆变部分来调控，联立计算式(2)、(5)和式(10)，有功电流、无功电流参考值表达式如式(16)所示。

$$\begin{cases} I_{Bat}^*=\dfrac{P^*}{U_{Bat}} \\ I_q^*=-\dfrac{2}{3u_{gd}}Q^* \end{cases} \tag{16}$$

于是采用基于补偿电流最小的功率协同调节策略的光储复合变流器的整体控制框图如图11所示。

3 仿真验证

为验证所提拓扑工作原理以及电压支撑策略的正确性，在MATLAB/Simulink仿真实验平台搭建了拓扑的仿真模型。拓扑仿真模型仿真运行步长为1e-6s，各元件具体参数信息如表2所示。

首先，对所提拓扑的工作原理以及控制策略进行验证，仿真验证场景如下：0.2s前蓄电池储能既不吸收功率也不输出功率，仅光伏并网，通过最大功率跟踪将功率送入电网；0.2s～0.4s，蓄电池储能进行功率输出，输出功率约为2kW；0.4s后，蓄电池储

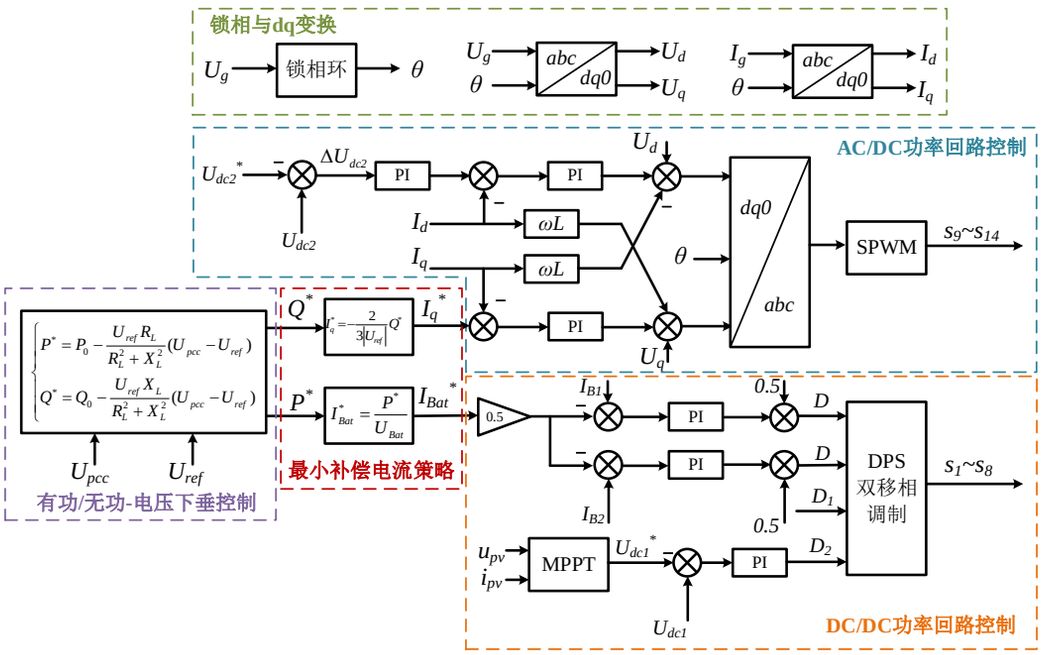


图 11　基于补偿电流最小功率协同策略的整体控制框图

Fig.11　Overall Control Block Diagram Based on Minimum Power Coordination Strategy of Compensation Current

表 2　光储复合变流器仿真参数表

Table.2　Simulation parameter table of photovoltaic energy storage composite inverter

参数	取值	参数	取值
U_{AC}/V	380(线电压)	L_{f2}/mH	1
U_{dc1}/V	400	C_{dc1}/ uF	200
U_{dc2}/V	800	C_{dc2}/ mF	5.6
U_{Bat}/V	200	C_f/ uF	2.2
L_1/mH	1	R_L/ Ω	1.98
L_2/ mH	1	X_L/ Ω	0.358
L_3/ uH	10	f_c/kHz	36
L_{f1}/mH	2.3	N	2

能进行功率吸收,吸收功率约为2kW。仿真结果如图12～14所示。

图12(a)给出了光伏阵列的PU曲线和IU曲线,在理论最大工作点处,光伏电压为400V,光伏电流为26A。图12(b)给出了仿真模型实际输出的光伏电压和光伏电流曲线,与理论值相同。

图13给出了网侧三相电流的波形图,复合变流器拓扑以单位功率因数运行,三相电流具有较好的正弦度,随着蓄电池输出功率的变化,三相电流可以较快地达到新的稳态值。

图14给出了各端口的有功功率波形图,流入电网的有功功率等于光伏输出的有功功率与蓄电池输出的有功功率之和。有功功率波形平滑,稳态下输出稳定,整体损耗较小,拓扑工作效率高。

进一步,对所提基于补偿电流最小的功率协同调节策略进行仿真验证,仿真验证场景如下:0.2s前,蓄电池不工作,仅光伏以最大功率并网;0.2s时,切除部分负荷,PCC点电压上升;0.4s时,采取补偿策略对PCC点电压进行补偿。相应的仿真结果如图15、16所示。

图15给出了前述仿真场景下PCC点的电压波形。在0.2s之前,光储复合变流器以单位功率运行,PCC点电压与电网电压相等;0.2s时,负荷切除,流经输电线路上的功率发生变化,PCC点电压由原先的311V抬升到321V;0.4s时,启动电压补偿策略,结合PCC点的电压偏差值对光储复合变流器的有功、无功输出进行调整,使得PCC点电压重新恢复至311V。

在实现相同电压补偿效果的前提下,图16(a)、(b)、(c)分别给出了采用无功功率调节策略、有功功率调节策略以及功率协同调节策略时,光储复合变流器输出的补偿电流仿真波形。其中,无功功率调节策略下的补偿电流幅值高达92A,有功功率调节策略下的补偿电流幅值约28A,而采用功率协同调节策略下的补偿电流幅值仅有12A。充分验证了所提拓扑以及电压控制策略的有效性与优越性。

4　结论

本文提出了一种光储复合变流器拓扑及其电压支撑控制策略,其具有以下优势:

1)所提光储复合变流器拓扑采用拓扑复用的

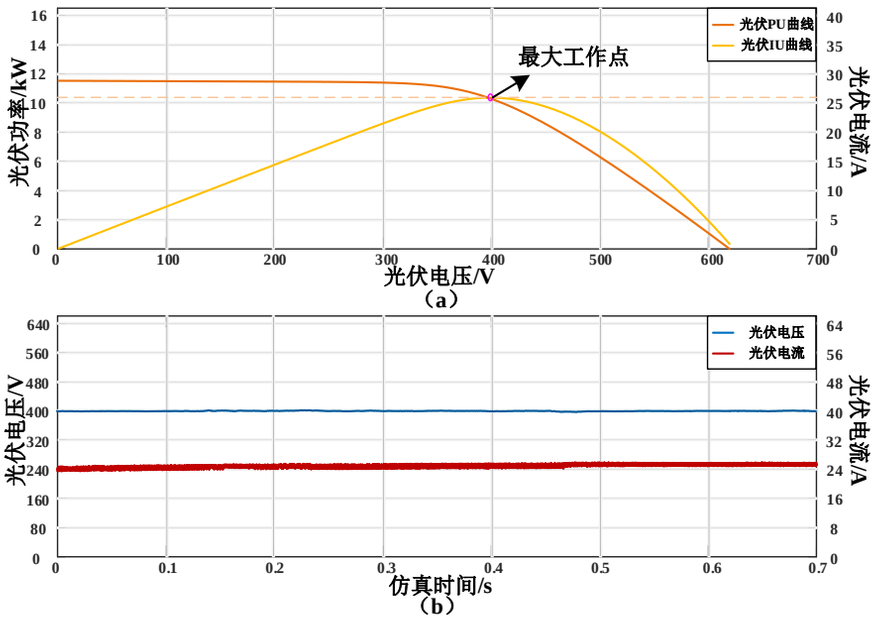


图 12　光伏最大功率跟踪仿真结果图

Fig.12　Simulation results of maximum power tracking for photovoltaics

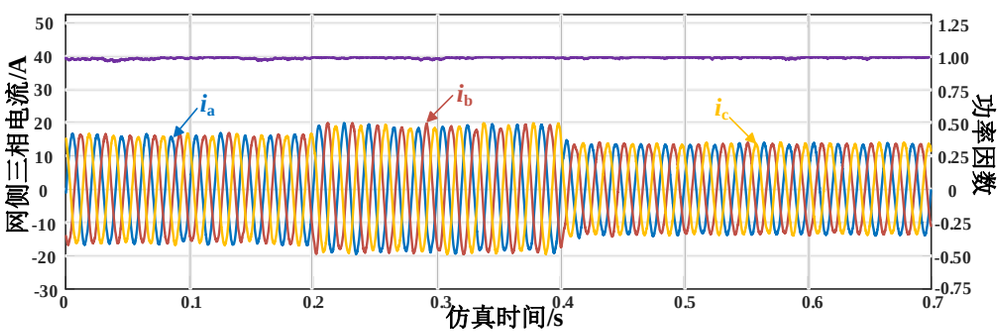


图 13　网侧三相电流波形图

Fig.13　Network side three-phase current waveform diagram

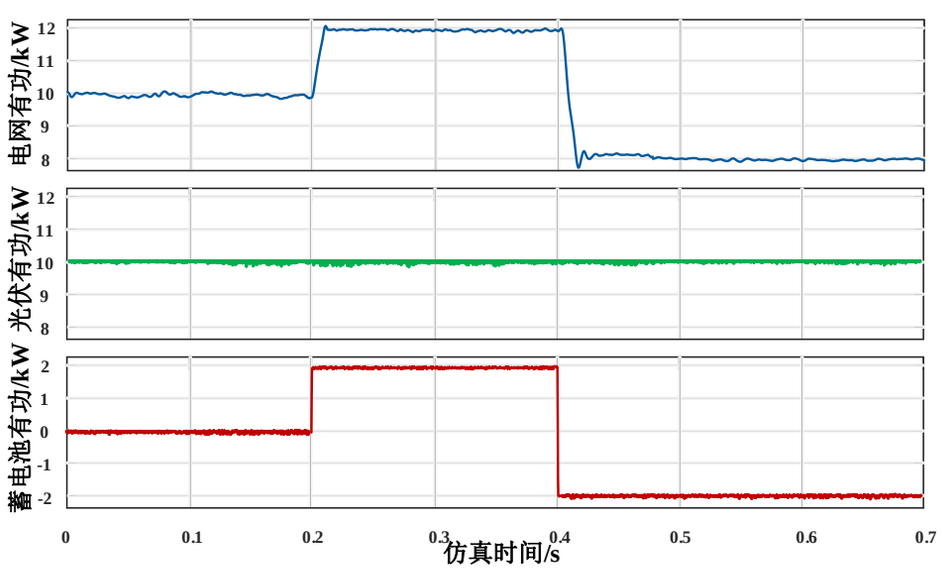


图 14　各端口有功功率波形图

Fig.14　Active power waveform diagram of each port

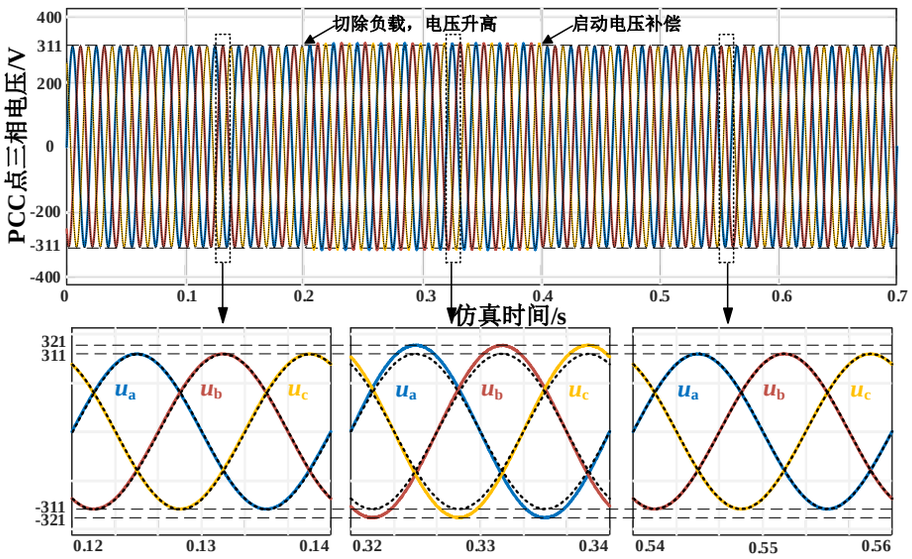


图 15　PCC 点电压仿真波形图

Fig.15　PCC point voltage simulation waveform diagram

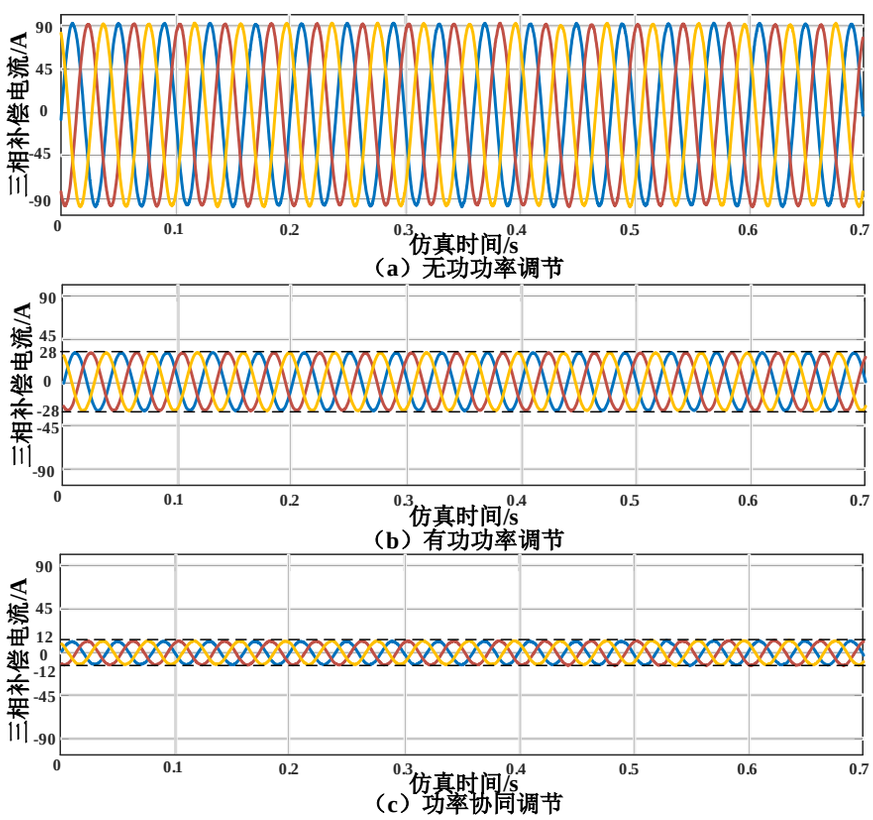


图 16　各调节策略下补偿电流仿真波形图

Fig.16　Simulation waveform diagram of compensation current under various adjustment strategies

方式实现储能的接入，相较于传统的组合式光储变流器，具有器件少、效率高等优势。

2）所提基于最小补偿电流的功率协同调节策略，给出了一种有功功率和无功功率的分配方法，使得在实现电压补偿的同时，并网变流器可以保持较高的功率因数输出且补偿电流最小。

3）实验结果表明通过控制蓄电池电流可以实现拓扑三个端口之间功率的灵活流通，具有较高的工作效率。启用功率协同调节的电压补偿策略后，PCC 点的电压可以被迅速补偿，且与其他补偿方式相比，本文所提电压补偿策略输出补偿电流幅值最小。

参考文献:

[1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(09):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key Technologies and Developing Challenges of Power System with High Proportion of Renewable Energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):171-191.

[2] 张明,王松峰.中压配电系统的电能质量治理研究[J].电气技术,2020,21(09):103-107.
Zhang Ming, Wang Songfeng. Study on power quality control of mid-voltage distribution system. Electrical Engineering, 2020, 21(9): 103-107.

[3] 刘英军,刘畅,王伟,等.储能发展现状与趋势分析[J].中外能源,2017,22(04):80-88.
Liu Yingjun, Liu Chang, Wang Wei, et al. Analysis of Development Status and Trend of Energy Storage Technology[J]. 2017, v.22(04): 80-88.

[4] 贾文慧,郭祺,涂春鸣,等.集成电压补偿与无功支撑能力的并网变换器拓扑优化及控制[J].电力系统自动化,2023,47(01):153-161.
JIA Wenhui, GUO Qi, TU Chunming, et al. Topology Optimization and Control of Grid-connected Converter with Integrated Voltage Compensation and Reactive Power Support Capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 153-161. DOI: 10.7500/AEPS20220422008.

[5] 米根锁,穆艳停.一种适用于光伏并网混合储能系统的功率分配策略[J].储能科学与技术,2018,7(04):726-731.
MI Gensuo, MU Yanting. A power allocation strategy of a hybrid energy storage system for a PV grid-connected system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(4): 726-731.

[6] 李建林,马会萌,惠东.储能技术融合分布式可再生能源的现状及发展趋势[J].电工技术学报,2016,31(14):1-10+20.
Li Jianlin, Ma Huimeng, Hui Dong. Present Development Condition and Trends of Energy Storage Technology in the Integration of Distributed Renewable Energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society 2016,31(14):1-10

[7] 黄晓明,范志华,苗世洪,等.含储能单元的统一电能质量调节器功率协调控制策略[J].高电压技术,2018,44(10):3390-3398.
HUANG Xiaoming, FAN Zhihua, MIAO Shihong, XU Dan, LÜ Wentao , MA Zhiquan. Coordinated Power Control Strategy of Unified Power Quality Conditioner with Energy Storage Unit. High Voltage Engineering. 2018, 44(10): 3390-3398.

[8] Joon-Ho Choi and Jae-Chul Kim, "Advanced voltage regulation method of power distribution systems interconnected with dispersed storage and generation systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 2, pp. 329-334, April 2001

[9] 许晓艳,黄越辉,刘纯,等.分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J].电网技术,2010,34(10):140-146.
Xu Xiaoyan, Huang Yuehui, Liu Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits [J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.

[10] MAJUMDER R. Aspect of voltage stability and reactive power support in active distribution[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 8(3): 442-450.

[11] C. -S. Chen, C. -H. Lin, W. -L. Hsieh, C. -T. Hsu and T. -T. Ku, "Enhancement of PV Penetration With DSTATCOM in Taipower Distribution System," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1560-1567, May 2013.

[12] S. -C. Hsieh, "Economic Evaluation of the Hybrid Enhancing Scheme With DSTATCOM and Active Power Curtailment for PV Penetration in Taipower Distribution Systems," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 3, pp. 1953-1961, May-June 2015.

[13] 王景钢,刘轶.考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(06):105-113.
WANG Jinggang, LIU Yi. Dynamic voltage support strategy for an active distribution network considering the current margin of a photovoltaic inverter[J]. Power System Protection and Control,2021,49(6):105-113

[14] 王超洋,张蓝宇,刘铮等.基于特征挖掘indRNN光伏发电功率预测[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(04):17-22.
WANG Chaoyang, ZHANG Lanyu, LIU Zheng, et al. Feature mining based indRNN photovoltaic power generation prediction[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(4): 17-22.

[15] 靳伟,王文宾,陈岩,张俏,赵静,王宁,*.计及分布式光伏有功削减的配电网全局电压综合优化策略[J].燕山大学学报,2020,44(2):164-172.
JIN Wei, WANG Wenbin, CHEN Yan, ZHANG Qiao,

ZHAO Jing, WANG Ning. Global voltage comprehensive optimization strategy for distribution network considering distributed photovoltaic power reduction[J]. Journal of YanShan University, 2020, 44(2):164-172.

[16] 黄祖委,黄智鹏,杨夏,等.含源配电网的无功电压分段自适应自治控制策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(9):10-18.
HUANG Zuwei, HUANG Zhipeng, YANG Xia, et al. Reactive voltage control strategy based on adaptive autonomous segment for distribution network with sources [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 10-18

[17] 严志伟,赵巧娥,杨艺,等.ADS并网点电压越限逆变器控制策略研究[J].电力电子技术,2018,52(1):77-80.
YAN Zhiwei, ZHAO Qiao'e, YANG Yi, et al. Study on control strategy of voltage out of limit inverter in ads parallel network[J]. Power Electronics Technology, 2018, 52(1): 77-80.

[18] 肖浩,裴玮,邓卫,孔力.分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J].电工技术学报,2016,31(增刊):203-213.
Xiao Hao, Pei Wei, Deng Wei, Kong Li. Analysis of the Impact of Distributed Generation on Distribution Network Voltage and Its Optimal Control Strategy. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(增刊): 203-213.

[19] H. Wu, K. Sun, S. Ding and Y. Xing, "Topology Derivation of Nonisolated Three-Port DC - DC Converters From DIC and DOC," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 7, pp. 3297-3307, July 2013.

[20] H. Krishnaswami and N. Mohan, "Three-Port Series-Resonant DC - DC Converter to Interface Renewable Energy Sources With Bidirectional Load and Energy Storage Ports," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 10, pp. 2289-2297, Oct. 200.

[21] X. Sun, Y. Shen, W. Li and H. Wu, "A PWM and PFM Hybrid Modulated Three-Port Converter for a Standalone PV/Battery Power System," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 4, pp. 984-1000, Dec. 2015.