

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.012

不对称故障下低电压穿越的多目标解耦控制策略

刘沁怡^{1,2}, 钟启迪³, 王诗雯^{1,2}, 卢亚军³, 孙金平³, 刘飞^{1,2}

(1. 武汉大学(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;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:在传统不对称故障低电压穿越控制中,由于控制自由度有限,并网逆变器控制存在无法同时实现输出电流负序分量和直流侧电压二倍频波动抑制的问题。对此,文中提出一种不对称故障下两级式光伏并网系统低电压穿越的多目标解耦控制策略。该策略将逆变器的控制目标设置为输出电流负序分量抑制,给出了综合考虑逆变器输出电流限幅和无功输出需求的逆变器电流内环控制参考值计算方法;通过双向 Buck-Boost 变换器将超级电容接入直流母线电容两端维持其电压稳定,并将直流侧电压二倍频波动转移至超级电容输入侧进行抑制。仿真结果表明,相比传统控制方法,所提控制策略有效降低了逆变器三相间的不平衡度,改善了输出电流畸变,减小了直流侧电压二倍频波动。

关键词:两级式光伏并网系统;不对称故障;低电压穿越;超级电容;二倍频波动;多目标解耦控制

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)01-0108-09

0 引言

新能源大规模入网是国家“双碳”目标实现的必然趋势^[1-3],而电网中电压跌落故障时有发生,其中不对称故障居多^[4]。为防止电压跌落故障导致新能源并网系统脱网,对电网稳定性产生负面影响,新能源并网场站必须具有低电压穿越能力^[5-7]。

现有两级式光伏并网系统的不对称故障低电压穿越控制策略相关研究,在维持直流母线电容两侧功率平衡和直流侧电压稳定^[8-11]、逆变器输出限流^[12-16]方面已有显著成果。在直流母线电压二倍频波动抑制方面,文献[17]推导了不对称故障下逆变器输出特性表达式,指出直流侧电压二倍频波动与逆变器输出有功功率波动有关,而有功波动抑制与负序电流抑制由于控制自由度有限无法同时实现,并针对这一问题引入了重复控制器,降低了逆变器故障工况下的输出电流谐波含量,但逆变器输出电流仍是不对称的。文献[18]提出一种自适应直流电压控制策略,将二倍频波动转移到前端直流输入源,维持直流母线电压在安全范围内。在逆变器输出电流负序分量抑制方面,文献[19]针对级联型光伏并网逆变器提出一种旁路控制策略,在故障期间通过旁路部分级联功率输出单元来降低逆变器输出功率。文献[20]针对级联多电平 H 桥变换器展开研究,在不对称故障期间通过电流控制向电

网注入有功和无功功率,可实现输出电流对称/不对称 2 种工况,但其主要研究点在于多并联支路的相间功率均衡和桥臂间电压均衡。以上研究在维持输出电流三相对称、提高输出电能质量方面均取得了良好效果,但直流母线电压存在较大的二倍频波动。基于以上研究成果,为同时实现直流侧电压二倍频波动抑制这一控制目标,文献[21]在原有控制环路中加入了比例谐振 (proportional resonant, PR) 控制,可在抑制输出电流负序分量的同时抑制直流侧电压二倍频波动。但该方法本质上是将在直流侧电压二倍频波动转移至了光伏直流输入端,会增大光伏侧输出功率波动。文献[22]在两级式光伏并网系统直流母线电容两端并联了超级电容,低电压穿越期间逆变器和光伏升压变换器控制功率输出,超级电容控制直流母线电压恒定。该方法可在控制逆变器输出电流的情况下,实现直流侧电压的独立控制。但该研究仅关注光伏侧输出特性,并未解决直流侧电压二倍频波动抑制的问题。

针对以上问题,文中提出一种不对称故障下两级式光伏并网系统低电压穿越的多目标解耦控制策略。该策略利用超级电容控制直流母线电压,给出考虑逆变器输出限流、无功输出要求和多控制目标的电流内环控制参考值计算流程,并在逆变器控制目标设置为输出电流负序分量抑制的前提下,将直流母线电压二倍频波动转移至超级电容输入侧,实现电流负序分量抑制和直流侧电压二倍频波动抑制 2 个控制目标的解耦。最后搭建 MATLAB/

收稿日期:2023-05-04;修回日期:2023-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877160)

Simulink 仿真模型,对文中所提控制策略进行仿真验证,仿真结果验证了所提方法的有效性。

1 两级式光伏并网系统运行特性分析

1.1 光伏发电并网系统结构

如图 1 所示,光伏发电经 DC/DC 变换器升压后,由逆变器并网。

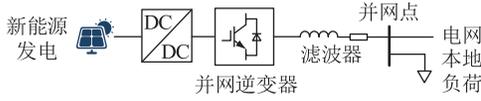


图 1 光伏发电并网系统

Fig.1 Grid-connected photovoltaic power generation system

并网系统正常运行时,前级 DC/DC 变换器为最大功率点(maximum power point tracking, MPPT)跟踪控制,并网逆变器为单位功率因数并网控制。

1.2 不对称故障下并网逆变器控制特性分析

当网侧发生不对称跌落时,逆变器输出的有功功率 P 、无功功率 Q 表达式^[23-25]为:

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{c2} \cos 2\omega t + P_{s2} \sin 2\omega t \\ Q = Q_0 + Q_{c2} \cos 2\omega t + Q_{s2} \sin 2\omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_0 、 P_{c2} 、 P_{s2} 分别为逆变器输出有功功率的直流分量、二次余弦分量和二次正弦分量; Q_0 、 Q_{c2} 、 Q_{s2} 分别为逆变器输出无功功率的直流分量、二次余弦分量和二次正弦分量; ω 为额定频率; t 为时间。

式(1)中各系数表达式为:

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q_0 \\ Q_{c2} \\ Q_{s2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{dP} & u_{qP} & u_{dN} & u_{qN} \\ u_{dN} & u_{qN} & u_{dP} & u_{qP} \\ u_{qN} & -u_{dN} & -u_{qP} & u_{dP} \\ u_{qP} & -u_{dP} & u_{qN} & -u_{dN} \\ u_{qN} & -u_{dN} & u_{qP} & -u_{dP} \\ -u_{dN} & -u_{qN} & u_{dP} & u_{qP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dP} \\ i_{qP} \\ i_{dN} \\ i_{qN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u_{dP} 、 i_{dP} 、 u_{dN} 、 i_{dN} 分别为网侧电压和电流的正、负序 d 轴分量; u_{qP} 、 i_{qP} 、 u_{qN} 、 i_{qN} 分别为网侧电压和电流的正、负序 q 轴分量。

由式(1)和式(2)可以看出,网侧发生不对称跌落故障后,逆变器输出有功和无功功率中存在二倍频分量,波动的幅值与网侧电压和电流的各序 dq 轴分量均有关。式(2)中,等式右侧系数矩阵与网侧电压各序分量相关,该矩阵中各元素在不对称电压跌落故障发生后为定值,因此等式左侧各功率输出的调节是通过等式右侧的电流矩阵控制来实现的。电流矩阵中存在 i_{dP} 、 i_{qP} 、 i_{dN} 、 i_{qN} 等 4 个可控变量,但须控制的输出量却有 P_0 、 P_{c2} 、 P_{s2} 、 Q_0 、 Q_{c2} 、 Q_{s2}

等 6 个,这说明有 2 个输出量无法得到控制。除逆变器输出有功直流分量 P_0 和无功直流分量 Q_0 这 2 个必控量外,其余的 4 个输出量控制只能根据不同的控制目标择其二。

逆变器输出有功功率中存在的二倍频波动分量,在直流侧会表现为在直流电容上产生直流母线电压二倍频波动。若控制目标是抑制直流侧电压二倍频波动,则须满足 $P_{c2} = 0$ 、 $P_{s2} = 0$ 以及 $Q_0 = 0$,代入式(2),可得:

$$\begin{cases} i_{dP\text{ref}} = \frac{2}{3} \times \frac{u_{dP}}{(u_{dP}^2 + u_{qP}^2) - (u_{dN}^2 + u_{qN}^2)} P_{\text{ref}} \\ i_{qP\text{ref}} = \frac{2}{3} \times \frac{u_{qP}}{(u_{dP}^2 + u_{qP}^2) - (u_{dN}^2 + u_{qN}^2)} P_{\text{ref}} \\ i_{dN\text{ref}} = -\frac{2}{3} \times \frac{u_{dN}}{(u_{dP}^2 + u_{qP}^2) - (u_{dN}^2 + u_{qN}^2)} P_{\text{ref}} \\ i_{qN\text{ref}} = -\frac{2}{3} \times \frac{u_{qN}}{(u_{dP}^2 + u_{qP}^2) - (u_{dN}^2 + u_{qN}^2)} P_{\text{ref}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{ref} 为逆变器有功功率直流分量参考值,即 P_0 ; $i_{dP\text{ref}}$ 、 $i_{qP\text{ref}}$ 分别为正序电流 d 轴分量参考值和 q 轴分量参考值; $i_{dN\text{ref}}$ 、 $i_{qN\text{ref}}$ 分别为负序电流 d 轴分量参考值和 q 轴分量参考值。

由式(3)可知,若控制目标是抑制直流侧电压二倍频波动,则 $i_{dN\text{ref}}$ 和 $i_{qN\text{ref}}$ 均不可能为 0。此时逆变器输出电流存在负序分量,也就是电流畸变率较高,电能质量较低。若控制目标是抑制逆变器侧输出的负序电流分量、降低网侧输出电流的不平衡度,则必须满足 $i_{dN\text{ref}} = 0$ 且 $i_{qN\text{ref}} = 0$,将 $Q_0 = 0$ 代入式(2),可得:

$$\begin{cases} i_{dP\text{ref}0} = \frac{2}{3} \times \frac{u_{dP}}{u_{dP}^2 + u_{qP}^2} P_{\text{ref}} \\ i_{qP\text{ref}0} = \frac{2}{3} \times \frac{u_{qP}}{u_{dP}^2 + u_{qP}^2} P_{\text{ref}} \\ i_{dN\text{ref}} = 0 \\ i_{qN\text{ref}} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i_{dP\text{ref}0}$ 、 $i_{qP\text{ref}0}$ 分别为控制目标是抑制直流侧电压二倍频波动时的正序电流 d 轴分量参考值和 q 轴分量参考值。

得到逆变器电流内环控制所需的 4 个参考值 $i_{dP\text{ref}}$ 、 $i_{qP\text{ref}}$ 、 $i_{dN\text{ref}}$ 、 $i_{qN\text{ref}}$ 后,分为正序分量和负序分量控制,经 dq 变换合成调制波,如图 2 所示, L 为逆变器的滤波电感。

2 多控制目标协同的不对称故障低电压穿越控制策略设计

两级式光伏并网系统结构如图 3 所示,其中,

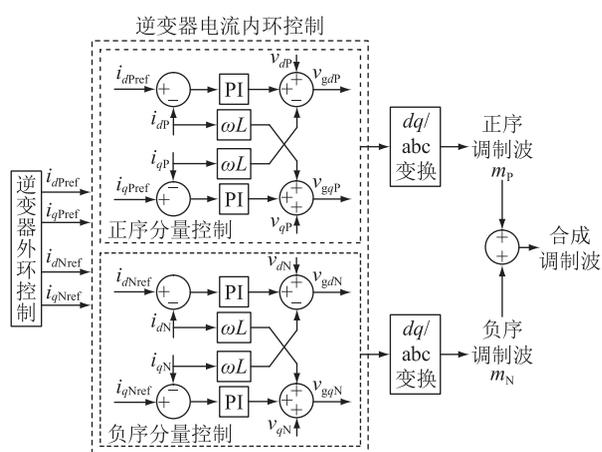


图2 逆变器电流内环控制框图

Fig.2 Inner current loop control block diagram of the inverter

V_{sa} 、 V_{sb} 、 V_{sc} 为网侧三相电压； v_a 、 v_b 、 v_c 为逆变器三相输出电压； i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器三相输出电流； r_g 、 L_g 分别为滤波电阻和电感； v_{dc} 为直流母线电压； v_{PV} 为光伏输出电压。光伏经过输出电容 C_{PV} 、前级 Boost 升压变换器和直流母线电容 C_{dc} 连接至后级并网逆变器， L_1 为 Boost 电路电感。另外直流母线上还带有本地负荷。在上述结构的基础上，文中在直流母线电容两端加入了超级电容 C_0 和可供能量双向传输的双向 Buck-Boost 变换器。 v_{C0} 为超级电容电压； L_2 、 L_3 为 Buck-Boost 电路电感； C_1 为 Buck-Boost 电路电容。三部分协同控制实现的控制目标为：(1) 逆变器输出电流负序分量抑制和直流母线电压二倍频波动抑制；(2) 直流母线电压稳压控制；(3) 光伏输出有功功率控制。

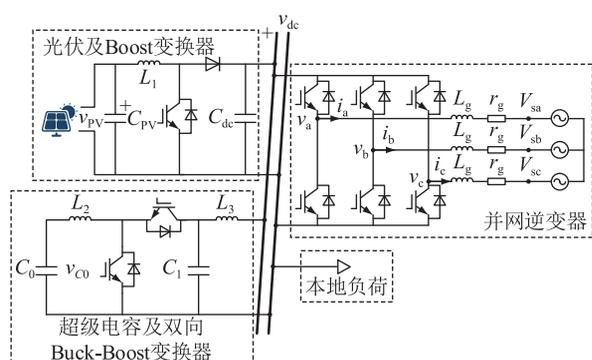


图3 两级式光伏并网系统结构

Fig.3 Structure of the two-stage grid-connected photovoltaic system

2.1 并网逆变器控制

逆变器有功功率直流分量参考值 P_{ref} 计算公式^[16]为：

$$P_{ref} = \frac{3}{2} (u_{dP} \sqrt{1.1i_N^2 - i_{qP}^2} + u_{dN} i_{dNref}) \quad (5)$$

式中： i_N 为光伏电站正常运行时额定电流的有效值。

由式(5)可知，若要计算 P_{ref} ，须获知 2 个关键变量：逆变器输出电流正序 q 轴分量参考值 i_{qPref} ，和负序 d 轴分量参考值 i_{dNref} 。

正序 q 轴分量 i_{qPref} 为逆变器在低电压穿越期间向电网输出的无功电流，这一变量的确定不仅仅是为满足控制目标，也有助于网侧故障清除后的电压恢复。在光伏电站低电压穿越相关国家标准 GB/T 19964—2012^[26]中对逆变器输出无功电流的幅度有明确要求，如式(6)所示。

$$\begin{cases} i_{qPref1} = 0 & V_{PCC} \geq 0.9 \\ i_{qPref1} \geq 1.5(0.9 - V_{PCC})i_N & 0.2 < V_{PCC} < 0.9 \\ i_{qPref1} \geq 1.05i_N & V_{PCC} \leq 0.2 \end{cases}$$

(6)

式中： i_{qPref1} 为满足光伏电站低穿要求时的正序电流 q 轴分量参考值； V_{PCC} 为并网点电压标么值。

i_{qPref} 确定后，考虑逆变器输出电流限幅， i_{dPref} 可通过 i_{qPref} 唯一确定，如式(7)所示。

$$i_{dPref1} = \sqrt{1.1i_N^2 - i_{qPref}^2} \quad (7)$$

式中： i_{dPref1} 为满足光伏电站低穿要求和输出电流限幅时的正序电流 d 轴分量参考值。

如 1.2 节中所分析的结果，由于逆变器控制自由度有限，无法同时实现抑制直流母线电压二倍频波动和逆变器输出电流负序分量这 2 个控制目标。文中的思路是，将直流电压二倍频波动转移至超级电容侧以解决该问题。因此，逆变器的控制目标须设置为抑制输出电流负序分量，即负序 d 轴分量参考值 $i_{dNref} = 0$ ，且负序 q 轴分量参考值 $i_{qNref} = 0$ 。

由于并网逆变器电流内环控制参考值的选择须同时考虑式(4)、式(6)和式(7)的需求，因此在参考值计算时须根据不同需求的优先级进行判别。综合考虑逆变器的控制目标和输出无功分量要求的 i_{qPref} 计算公式为：

$$i_{qPref} = \begin{cases} i_{qPref0} & i_{qPref0} > i_{qPref1} \\ i_{qPref1} & i_{qPref0} \leq i_{qPref1} \end{cases} \quad (8)$$

综合考虑逆变器的控制目标和输出电流限幅的 i_{dPref} 计算公式为：

$$i_{dPref} = \begin{cases} i_{dPref0} & i_{dPref0} < i_{dPref1} \\ i_{dPref1} & i_{dPref0} \geq i_{dPref1} \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可看出，逆变器输出 i_{qPref} 应优先满足对电网输出无功功率进行电压支撑的要求，而 i_{dPref} 应在满足逆变器输出电流限幅的前提下，优先满足抑制负序分量这一控制目标。

综上所述，文中所提逆变器电流内环控制指令

计算流程如图4所示。

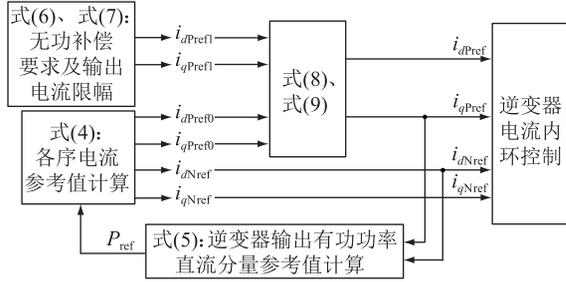


图4 逆变器电流内环控制指令计算流程

Fig.4 Reference value calculation process of the inverter inner current loop control

2.2 光伏升压变换器控制

为了加快光伏侧输出响应速度,该侧 Boost 变换器与 2.1 节并网逆变器控制共用同一有功功率指令,采用定功率控制。图5为光伏升压变换器控制框图,该变换器采用功率外环-电流内环的双环控制策略,其中, i_{L1ref} 、 i_{L1} 分别为电感 L_1 电流的参考值和实际值; d_B 为光伏升压变换器开关管占空比; P_{load} 为负荷功率; P_{PV} 为光伏阵列的实际输出功率。

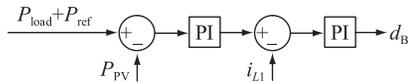


图5 光伏升压变换器控制框图

Fig.5 Control block diagram of PV boost converter

i_{L1ref} 的表达式为:

$$i_{L1ref} = (K_{p,p} + K_{i,p}/s)(P_{ref} + P_{load} - P_{PV}) \quad (10)$$

式中: $K_{p,p}$ 为功率外环比例积分(proportional integral, PI)控制器比例系数; $K_{i,p}$ 为功率外环PI控制器积分系数。

光伏升压变换器开关管占空比 d_B 表达式为:

$$d_B = (K_{p,i} + K_{i,i}/s)(i_{L1ref} - i_{L1}) \quad (11)$$

式中: $K_{p,i}$ 为变换器电流内环PI控制器比例系数; $K_{i,i}$ 为电流内环PI控制器积分系数。

2.3 双向 Buck-Boost 电路控制

在 2.1 节中逆变器控制设定为输出电流负序分量抑制控制的前提下,直流母线电压必然存在二倍频波动。在系统不对称故障时的低电压穿越期间,超级电容除了控制直流母线电压恒定外,还可考虑将直流电压的二倍频波动通过变换器控制转移至超级电容侧。

超级电容侧 Buck-Boost 电路控制框图如图6所示,其中 V_{dcref} 为直流母线电压参考值; i_{L2} 为超级电容输出电流实际值; d_{C0} 为开关管占空比。若直流母线电压控制外环仅用PI控制,则无法准确跟踪电压中

存在的二倍频分量。因此在原有的PI控制基础上,在控制环路中加入了陷波器。

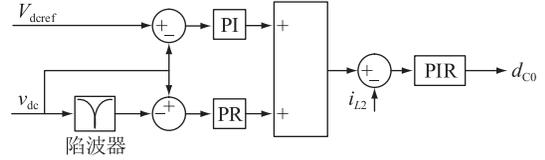


图6 双向 Buck-Boost 电路控制框图

Fig.6 Control block diagram of bi-directional Buck-Boost circuit

陷波器的作用是滤除特定频率的分量,其传递函数 $G_1(s)$ [27-29] 为:

$$G_1(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + \xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (12)$$

式中: ξ 为陷波因子; ω_n 为陷波中心频率。为滤除直流母线电压的二倍频分量,文中 ω_n 取 200π , $\xi\omega_n$ 取 1 000。

利用陷波器滤除直流母线电压中的二倍频分量,该过程的表达式为:

$$v_{dc_0} = G_1(s)v_{dc} \quad (13)$$

式中: v_{dc_0} 为滤除二倍频分量后的直流母线电压。

滤除直流电压二倍频波动分量后,采用PR控制将其引入电感 L_2 的电流控制。超级电容输出电流参考值 i_{L2ref} 的表达式为:

$$i_{L2ref} = \left(K_{p,PI} + \frac{K_{i,PI}}{s} \right) (V_{dcref} - v_{dc}) + \left(K_{p,PR} + \frac{2K_{r,PR}s}{s^2 + \omega_0^2} \right) (v_{dc} - v_{dc_0}) \quad (14)$$

式中:等式右侧第一项为直流分量,其中 $K_{p,PI}$ 为电压外环PI控制器比例系数; $K_{i,PI}$ 为电压外环PI控制器积分系数;第二项为二倍频交流分量,其中 $K_{p,PR}$ 为电压外环PR控制器比例系数; $K_{r,PR}$ 为电压外环PR控制器谐振系数; ω_0 为PR控制器的谐振频率,由于该控制器的控制对象为二倍频分量, ω_0 取 200π 。

如式(14)所示,由于电感电流参考值中同时存在直流分量和二倍频分量,电感电流内环控制采用比例积分谐振(proportional-integral-resonant, PIR)控制,内环输出的双向 Buck-Boost 变换器开关管占空比 d_{C0} 的表达式为:

$$d_{C0} = \left(K_{p,PIR} + \frac{K_{i,PIR}}{s} + \frac{2K_{r,PIR}s}{s^2 + \omega_0^2} \right) (i_{L2ref} - i_{L2}) \quad (15)$$

式中: $K_{p,PIR}$ 为电流内环PIR控制器比例系数; $K_{i,PIR}$ 为电流内环PIR控制器积分系数; $K_{r,PIR}$ 为电流内环PIR控制器谐振系数。

3 仿真验证及结果分析

为验证文中所提出控制策略的有效性,利用 MATLAB/Simulink 搭建两级式并网光伏系统的仿真模型,系统仿真参数如表 1 所示,且开展了传统不对称故障低电压穿越控制策略和文中所提控制策略的对比性仿真验证^[17-20]。为了展示文中所提出控制策略在系统低电压穿越期间的效果,在相同的仿真设定下,增加一组传统不对称低电压穿越控制下的对比仿真。从技术层面看,与文中控制策略相比,在传统控制下,故障期间逆变器输出功率直流分量参考值由直流母线电压外环决定,无明确定量计算方法,且逆变器输出电流负序分量抑制和直流侧电压二倍频波动抑制 2 个控制目标无法解耦。

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the system

参数	数值	
电感 $L_1/\mu\text{H}$	550	
光伏侧输出电容 $C_{PV}/\mu\text{F}$	1 000	
直流母线电容 $C_{dc}/\mu\text{F}$	600	
Boost 变换器	电流内环比例系数 $K_{p,i}$ 、 积分系数 $K_{i,i}$	1, 20
	功率外环比例系数 $K_{p,p}$ 、 积分系数 $K_{i,p}$	0.5, 20
	网侧额定电压有效值 V_g/V	220
	电网频率 f/Hz	50
并网逆变器	滤波电阻 r_g 、电感 L_g	0.01 Ω 、4 mH
	电流内环比例系数 K_p 、 积分系数 K_i	1, 40
	电感 $L_2/\mu\text{H}$	550
Buck-Boost 变换器	超级电容 $C_0/\mu\text{F}$	5 000
	PIR 控制器比例系数 $K_{p,PIR}$ 、 积分系数 $K_{i,PIR}$ 、谐振系数 K_r,PIR	2, 20, 10

光伏阵列在温度 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ 和光照强度 $I=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 的标准条件下运行,光伏阵列 MPPT 电压 V_{MPP} 为 348 V,对应电流 I_{MPP} 为 14.7 A,最大输出功率为 5 110 W,直流母线上所带本地负荷为 1 kW。

图 7(a)为网侧电压 V_{sabc} 波形,图 7(b)为网侧电压在 1 s 附近的局部放大图。仿真工况为:网侧 A 相电压在 1 s 时刻跌落至 0.2 p.u.,系统在 1 s 时刻切换至低电压穿越控制,1 s—2 s 时段逆变器控制目标为抑制直流母线电压二倍频波动,2 s—3 s 时段逆变器控制目标切换为抑制逆变器输出负序电流分量,3 s 时刻网侧电压恢复正常。

在文中控制方法下逆变器输出电流 I_{sabc} 波形如图 8 所示,传统控制策略下逆变器输出电流波形如图 9 所示。对比图 8 和图 9 可知,在抑制逆变器输

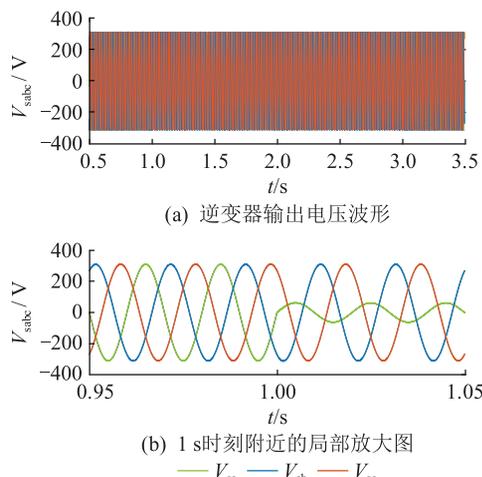


图 7 网侧电压波形及局部放大图
Fig.7 Waveforms of the grid-side voltage and in detail view

出电流负序分量方面,文中控制方法与传统控制方法效果基本相同。

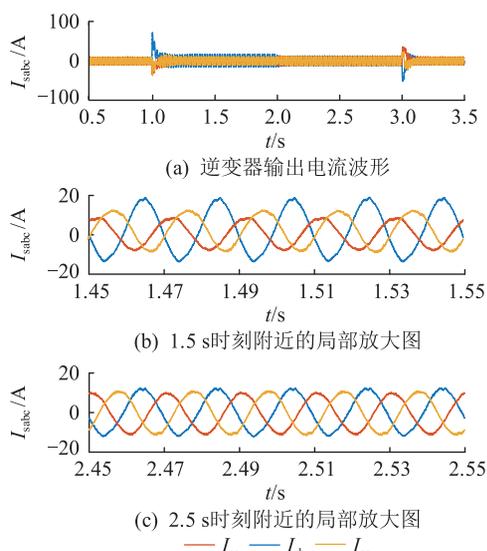


图 8 文中控制策略下逆变器输出电流波形及局部放大图
Fig.8 Waveforms of the inverter output current under the proposed control strategy and in detail view

文中控制方法下直流母线电压 v_{dc} 波形如图 10 所示,传统控制策略下直流母线电压波形如图 11 所示。对比图 10 和图 11 可知,在抑制直流侧电压二倍频波动方面,直流母线电压达到稳态之后,文中控制方法相比传统控制方法下的直流侧电压二倍频波动有明显降低,在 2 s—3 s 期间,逆变器控制目标为逆变器输出电流负序分量抑制时,文中控制方法下的直流侧电压二倍频波动不超过 2 V,而传统控制方法下的直流侧电压二倍频波动接近 5 V。

由仿真结果可知,在低电压穿越期间,直流母线电压保持在额定值 1 200 V。与图 8(b)所示的逆变器输出电流局部放大图对比来看,在 1 s—2 s 期

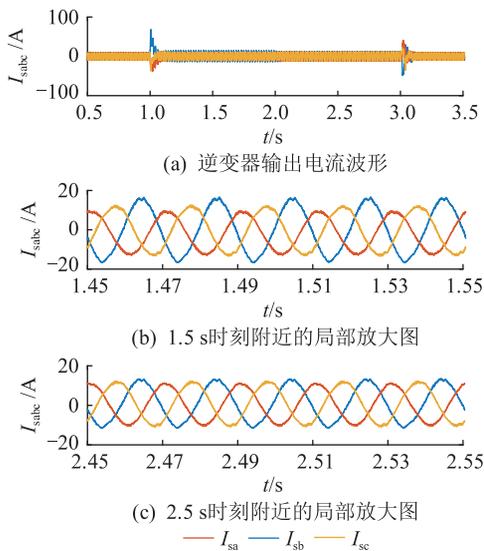


图9 传统控制策略下逆变器输出电流波形及局部放大图

Fig.9 Waveforms of the inverter output current under the traditional control strategy and in detail view

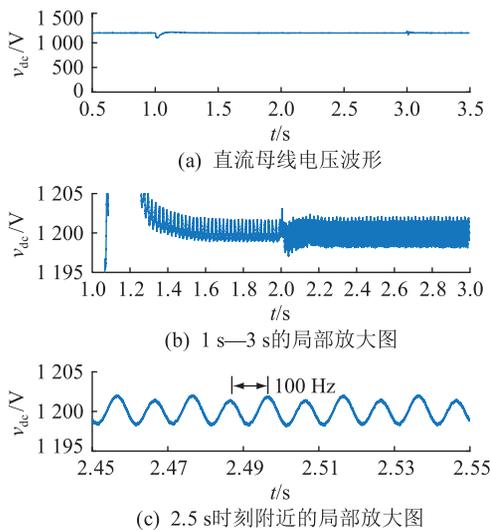


图10 文中控制策略下直流母线电压波形及局部放大图

Fig.10 Waveforms of the DC bus voltage under the proposed control strategy and in detail view

间,逆变器采用直流母线电压二倍频波动抑制控制,A、B、C三相之间严重不平衡,逆变器输出电流畸变严重,电能质量低,但此时直流母线电压二倍频波动不明显;在2 s—3 s期间,逆变器采用输出电流负序分量抑制控制,与1 s—2 s时段相比,A、B、C三相间的不平衡度降低,输出电流畸变得得到改善,但直流母线电压二倍频波动幅度有轻微升高,波动最大偏差值不超过2 V。

在文中控制方法下光伏侧输出功率实际值 P_{PV} 和参考值 P_{ref} 波形如图12所示,光伏根据功率指令值调整了自身输出功率,实现了快速跟踪。在1 s—3 s所示的低电压穿越控制期间,光伏侧输出功率实际值与参考值间存在1 kW的功率差值,是因为该

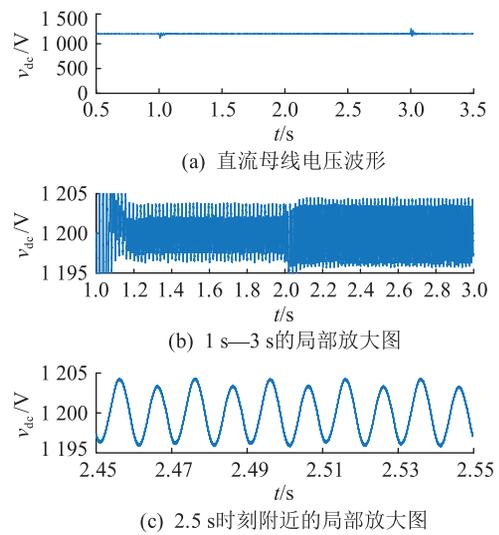


图11 传统控制策略下直流母线电压波形及局部放大图

Fig.11 Waveforms of the DC bus voltage under the traditional control strategy and in detail view

参考值为逆变器输出功率的参考值,而光伏侧输出功率为逆变器输出功率和本地负荷功率之和,文中仿真中设置的本地负荷功率为1 kW。

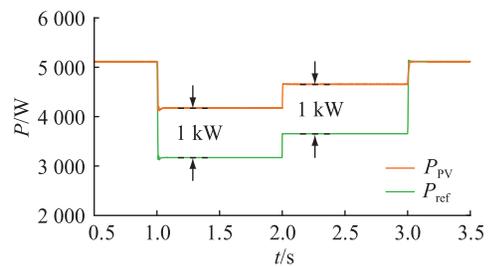


图12 文中控制策略下光伏输出功率波形

Fig.12 Waveforms of the PV output power under the proposed control strategy

传统控制策略下光伏输出功率波形如图13所示。

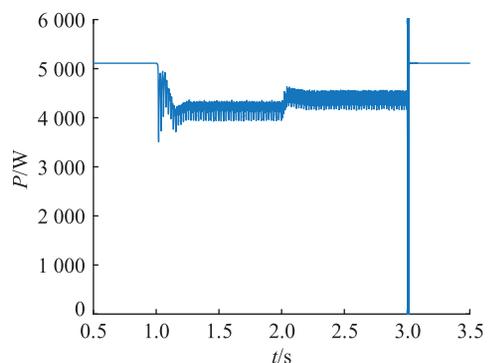


图13 传统控制策略下光伏输出功率波形

Fig.13 Waveforms of the PV output power under the traditional control strategy

对比图12和图13可知,在光伏侧输出暂态特性方面,文中控制方法下的光伏侧输出功率能迅速跟踪指令值,而传统控制方法下的光伏侧输出功率

存在明显谐波分量,且在低电压穿越过程结束,控制策略切换至正常运行控制时,光伏侧输出功率出现了较大波动。

在文中控制方法下超级电容电压 v_{c0} 及输出电流 i_{L2} 波形如图 14 所示。由图 14(c) 可知,2 s—3 s 时段内逆变器控制目标为抑制输出电流负序分量时,采用文中控制方法将直流侧电压二倍频波动转移至超级电容侧,因此超级电容输出电流呈二倍频波动。

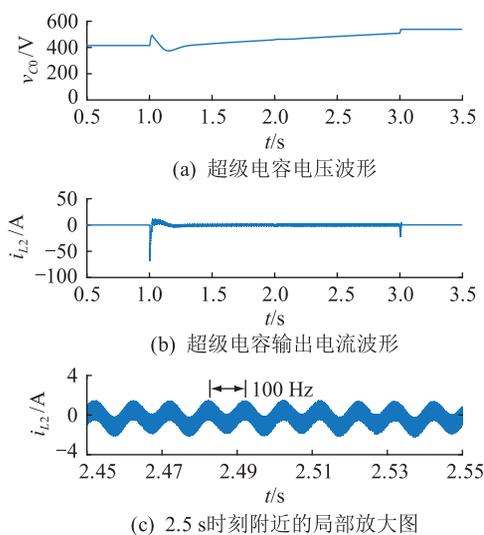


图 14 文中控制策略下超级电容电压和输出电流波形及局部放大图

Fig.14 Voltage and current waveforms of the super-capacitor under the proposed control strategy and in detail view

4 结语

文中研究了不对称故障下的两级式光伏并网系统,提出了一种多目标解耦控制策略,该策略有如下特点:

(1) 并网系统低电压穿越运行期间,光伏升压变换器为定有功功率控制,超级电容侧变换器为定直流母线电压控制,逆变器为输出电流负序分量抑制控制;

(2) 在逆变器控制目标为输出电流负序分量抑制时,通过将直流侧电压二倍频波动分量分离并前馈至超级电容侧双向 Buck-Boost 变换器的电感电流内环控制,将直流侧电压二倍频波动转移至超级电容输入侧,增加了系统的控制自由度,实现了逆变器输出电流负序分量抑制和直流侧电压二倍频波动抑制 2 个控制目标的解耦。

参考文献:

[1] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(8):2-12.

HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12.

[2] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术 [J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.

HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[3] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.

ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.

[4] ZHANG Y J, WANG J, LI H, et al. Dynamic performance improving sliding-mode control-based feedback linearization for PV system under LVRT condition [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11745-11757.

[5] 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(9): 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.

[6] 易洋,骆雅姿,张子瑜,等. 集中式光伏电站汇集系统故障分析与保护方案 [J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 2-10.

YI Yang, LUO Yazhi, ZHANG Ziyu, et al. Failure analysis and protection scheme of centralized photovoltaic power station convergence system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 2-10.

[7] 王琦,徐俊杰,李星硕,等. 基于柔性工作点追踪的光伏低电压穿越控制策略 [J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 55-63.

WANG Qi, XU Junjie, LI Xingshuo, et al. Photovoltaic low-voltage ride-through control strategy based on flexible power point tracking [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 55-63.

[8] 贾科,宣振文,朱正轩,等. 光伏直流升压接入系统故障穿越协同控保方法 [J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3249-3258.

JIA Ke, XUAN Zhenwen, ZHU Zhengxuan, et al. A coordinated control and active protection for PV DC boosting integration system during FRT [J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3249-3258.

[9] SRINIVAS V L, SINGH B, MISHRA S. Fault ride-through strategy for two-stage grid-connected photovoltaic system enabling load compensation capabilities [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8913-8924.

- [10] 杨春波,王晶晶,康鹏,等. 基于混合型算法的光伏发电系统低电压穿越控制策略[J]. 中国电力,2020,53(3):18-27,58.
YANG Chunbo,WANG Jingjing,KANG Peng,et al. Research on LVRT control strategy of photovoltaic system based on hybrid control algorithm[J]. Electric Power,2020,53(3):18-27,58.
- [11] ZHAO T,CHEN D L. Active power backflow control strategy for cascaded photovoltaic solid-state transformer during low-voltage ride through[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2022,69(1):440-451.
- [12] 杨超颖,王金浩,杨赞磊,等. 不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(16):103-111.
YANG Chaoying,WANG Jinhao,YANG Yunlei,et al. Control strategy to suppress peak current for grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control,2018,46(16):103-111.
- [13] 彭星,姜飞,涂春鸣,等. 不对称故障下光伏逆变器的最优电压支撑策略[J]. 电网技术,2021,45(11):4259-4268.
PENG Xing,JIANG Fei,TU Chunming,et al. Optimal voltage support strategy for photovoltaic inverters under asymmetric faults[J]. Power System Technology,2021,45(11):4259-4268.
- [14] ZHAO T,CHEN D L. Analysis and suppression of active power backflow of three-phase common DC-bus cascaded H-bridge PV grid-connected inverter during LVRT[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2022,10(1):745-759.
- [15] ISLAM M,NADARAJAH M,HOSSAIN M J. A grid-support strategy with PV units to boost short-term voltage stability under asymmetrical faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(2):1120-1131.
- [16] JI L,SHI J B,HONG Q T,et al. A multi-objective control strategy for three phase grid-connected inverter during unbalanced voltage sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2021,36(4):2490-2500.
- [17] 赵峰,李述特,陈小强,等. 不平衡电网下三相PWM整流器预测直接功率控制[J]. 电网技术,2022,46(3):870-879.
ZHAO Feng,LI Shute,CHEN Xiaoqiang,et al. Predictive direct power control of three phase PWM rectifier under unbalanced grid[J]. Power System Technology,2022,46(3):870-879.
- [18] DING G Q,GAO F,TIAN H,et al. Adaptive DC-link voltage control of two-stage photovoltaic inverter during low voltage ride-through operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(6):4182-4194.
- [19] 王书征,李先允,许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(13):84-91.
WANG Shuzheng,LI Xianyun,XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. Power System Protection and Control,2019,47(13):84-91.
- [20] TAFTI H D,MASWOOD A I,KONSTANTINOOU G,et al. Flexible control of photovoltaic grid-connected cascaded H-bridge converters during unbalanced voltage sags[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(8):6229-6238.
- [21] 王茂春,陈春萌,杨凯璇,等. 电网电压不平衡跌落下两级式光伏并网系统直压控制策略[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(3):283-291.
WANG Maochun,CHEN Chunmeng,YANG Kaixuan,et al. DC voltage control strategy of two-stage photovoltaic grid-connected system under unbalanced voltage drop of grid[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(3):283-291.
- [22] 王诗雯,刘飞,刘沁怡,等. 不对称故障下两级式光伏并网系统低电压穿越控制[J]. 电网技术,2023,47(1):91-102.
WANG Shiwen,LIU Fei,LIU Qinyi,et al. Low-voltage riding-through control strategy for two-staged grid-connected photovoltaic system under asymmetrical faults[J]. Power System Technology,2023,47(1):91-102.
- [23] 苗常海,杨东升,寇健. 基于负序电压前馈的非对称故障下低电压穿越控制方法研究[J]. 太阳能学报,2018,39(4):1149-1155.
MIAO Changhai,YANG Dongsheng,KOU Jian. Research of low voltage ride through control strategy based on negative sequence voltage feedforward under unsymmetrical fault[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2018,39(4):1149-1155.
- [24] 钮厚敏,贾科,刘鑫,等. 光伏直流升压场站并网整体协同低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(8):1-12.
NIU Houmin,JIA Ke,LIU Xin,et al. Overall coordinated low voltage ride-through control strategy for grid connection of photovoltaic DC booster station[J]. Power System Protection and Control,2023,51(8):1-12.
- [25] 袁庆伟,吴扣林,谢晔源,等. 不平衡电网下风电并网逆变器直接正负序功率控制[J]. 供用电,2023,40(1):88-96,104.
YUAN Qingwei,WU Koulin,XIE Yeyuan,et al. Direct positive and negative sequence power control of wind power grid-connected inverter under unbalanced grid condition[J]. Distribution & Utilization,2023,40(1):88-96,104.
- [26] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system:GB/T 19964-2012[S]. Beijing:Standards Press of China,2013.
- [27] 王浩,聂晶莹,李斌,等. 电网电压不平衡下交直流混合微电网互联接口变换器分数阶滑模控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(16):94-103.

WANG Hao, NIE Jingying, LI Bin, et al. Fractional order sliding mode control strategy of AC/DC hybrid microgrid interconnection interface converter under grid voltage imbalance [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 94-103.

[28] 苏向敬, 刘一航, 张知宇, 等. 计及源荷不确定影响的不平衡配电网两阶段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 94-103.

SU Xiangjing, LIU Yihang, ZHANG Zhiyu, et al. Two-stage optimization of unbalanced distribution networks considering impacts of DG and load uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 94-103.

[29] 汤旻安, 高晓红. 不平衡电网电压条件下光储微电网并网控制[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1879-1888.

TANG Min'an, GAO Xiaohong. Grid-connected control of microgrid with photovoltaic and energy storage systems under unbalanced grid voltage conditions [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1879-1888.

作者简介:



刘沁怡

刘沁怡(2001),女,硕士在读,研究方向为新能源发电与并网控制(E-mail: qinyiliu@whu.edu.cn);

钟启迪(1985),男,硕士,高级工程师,从事特高压和柔性直流输电系统设计与仿真工作;

王诗雯(1998),女,硕士,研究方向为光伏并网的故障穿越控制。

Multi-objective decoupling control strategy for low voltage ride through under asymmetrical faults

LIU Qinyi^{1,2}, ZHONG Qidi³, WANG Shiwen^{1,2}, LU Yajun³, SUN Jinping³, LIU Fei^{1,2}

(1. Wuhan University (Hubei Key Laboratory of Power Equipment & System Security for Integrated Energy), Wuhan 430072, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: For the traditional low voltage ride through control under asymmetrical faults, due to the limited control degrees of freedom, the grid-connected inverter control suffers from the problem of not being able to simultaneously realize the output current negative-sequence component suppression and the DC side voltage double-frequency fluctuation suppression. In this regard, a multiple-objective decoupling control strategy is proposed for low voltage ride through of two-stage grid-connected photovoltaic system under asymmetrical faults. The strategy sets the control objective of the inverter as the negative-sequence component suppression of the output current and gives a reference value calculation method for the inner current loop considering the inverter output current limit and reactive power output demand. The super-capacitor is connected to both ends of the DC bus capacitor through the bidirectional Buck-Boost converter to maintain its voltage stability, and the DC side voltage double-frequency fluctuation is transferred to the super-capacitor side. The simulation results show that under the proposed control strategy, the unbalance between three phases of the inverter is reduced and the output current distortion is improved. The double frequency fluctuation of the DC side voltage is reduced significantly compared with the traditional control method.

Keywords: two-stage grid-connected photovoltaic system; asymmetrical fault; low voltage ride through; super-capacitor; double-frequency fluctuation; multi-objective decoupling control

(编辑 钱悦)