

面向铁路牵引供电网的光伏发电 混合电流控制

张伟秋¹, 程鹏¹, 张婧妍², 侯大志², 孙世杰², 马静³

(1. 华北电力大学 能源电力创新研究院, 北京 102206;
2. 中车长春轨道客车股份有限公司 工程研究中心, 吉林 长春 130062;
3. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 随着低碳化交通的持续发展, 铁路交通沿线所蕴含的太阳能资源禀赋开发利用势在必行。利用铁路沿线空间资源实施光伏发电, 不仅可为铁路牵引系统提供清洁电力, 也可拓展新能源发电消纳空间。因此, 文章提出面向铁路牵引供电网的光伏发电混合电流控制策略。该控制实施于三相静止坐标系, 构造由传输光伏功率所需的正序电流分量与补偿牵引负荷所需的负序电流分量的混合电流受控目标, 实现光伏逆变器的并网发电与负序补偿的统一控制。同时, 该控制策略可在无需相序分离与提取的条件下, 完成对单相牵引负荷负序电流的补偿, 增强高压侧电网电能质量。最后, 在RTLAB硬件在环试验平台验证了文章所提控制策略的有效性。

关键词: 电气化铁路; 牵引供电; 光伏发电; 混合电流; 负序补偿; 仿真

中图分类号: TM615; U223

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2022)03-0045-08

Hybrid current regulation of photovoltaic power integrated in railway traction power supply system

ZHANG Weiqiu¹, CHENG Peng¹, ZHANG Jingyan², HOU Dazhi², SUN Shijie², MA Jing³

(1. Energy and Power Innovation Research Institute, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Engineering Research Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China;
3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the sustainable development of low-carbon transportation, it is imperative to develop and utilize the solar energy resources along the railway. Using the space resources along the railway to implement photovoltaic power generation can not only provide clean electricity for railway traction system, but also expand the consumption space of new energy power generation. Therefore, a hybrid current control strategy of photovoltaic power generation for railway traction power supply network was proposed. The control was implemented in the three-phase static coordinate system, and the mixed current was controlled by the positive sequence current component required by photovoltaic power transmission and the negative sequence current component required by traction load compensation, so as to realize the unified control of grid-connected power generation and negative sequence compensation of photovoltaic inverters. At the same time, the control strategy can complete the negative sequence current compensation of single-phase traction load without phase sequence separation and extraction, and enhance the power quality of high-voltage side grid. Finally, the effectiveness of the proposed con-

收稿日期: 2022-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2601600)

通信作者: 程鹏 (1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为新能源交通系统、新型电力系统;

E-mail: p.cheng@ncepu.edu.cn

trol strategy was verified on the RT-LAB hardware-in-the-loop experimental platform.

Keywords: electrified railway; traction power supply; photovoltaic power; hybrid current; negative-sequence current compensation; simulation

0 引言

近年来,我国铁路规模快速发展,截至2021年底,全国铁路总里程超过15万km^[1]。根据国际能源署的预测^[2-5],预计到2030年,中国铁路总里程将达到20万km,随着铁路规模的持续扩大,电力消耗量也将明显增加,将达到191.9 TW·h。因此,在国家“30-60”双碳目标下,推进清洁能源在铁路中的应用,就显得十分关键。

由于光伏发电设备安装灵活、运维便捷,因此它可在电气化铁路沿线护坡、预留地等闲置空间安装,并为电气化铁路提供清洁电力。目前,适用于三相光伏逆变器接入铁路牵引系统的结构,主要有高压侧接入、牵引侧接入两大类。文献[6-7]研究了直接将光伏接入铁路牵引供电系统的高压110 kV母线侧,而无需对牵引网进行改造。由于光伏逆变器输出电压较低,需要采用高变比的变压器才能并网,而导致光伏发电损耗较大。另一方面,文献[8-11]利用V/v变压器的两相三相电压转换功能,构造三相交流低压母线,实现三相光伏逆变器在牵引侧的有效接入,并降低光伏功率传输损耗。此外,可借鉴多功能逆变器功能,在保证光伏功率全部输出的同时,可利用光伏逆变器剩余功率裕量补偿单相牵引负荷所产生的负序电流,降低高压侧电网的不对称度。

基于此,在三相光伏逆变器从牵引侧有效接入的情况下,为实现光伏并网发电与负序补偿的统一控制,光伏逆变器需具备正、负序电流调控的能力。文献[12-13]首先进行坐标旋转变换得到正负序电流参考值,提出dq坐标系下限制电流峰值的方法,从而保证在不平衡电压场景下,光伏逆变器输出电流不超过最大允许电流值。文献[14-15]提出一种可实现并网电流对称,有效抑制有功和无功波动等控制目标的正、负序电流指令配置方案,然而,在这种情况下容易出现过电流现象,造成变流器设备损坏。上述正负序受控电流目标配置方案均以达到装备并网有功/无功平稳、转矩无波动等特性进行配置,而很少涉及负荷平衡方面。

因此,本文提出面向铁路牵引供电网的光伏发电混合电流控制策略。该控制策略在三相静止坐标系生成由传输光伏功率所需的正序电流分量与补偿牵引负荷所需的负序电流分量的混合电流受控目标,从而可在无需相序分离与提取的条件下,完成对单相牵引负荷负序电流的补偿,实现光伏逆变器的并网发电与负

序补偿的统一控制,提高系统的运行友好性。

1 系统拓扑结构

如图1所示,三相110 kV高压经过V/v三相-两相变压器(MT1)和V/v两相-三相变压器(MT2)后转变为三相低压,从而可为低压运行的光伏逆变器提供公共母线,即光伏逆变器经过Dyn11(MT3)变压器进行电压变换后可直接并联接入低压交流母线,为更多光伏逆变器的接入提供了可能性。在图1中, k_1 、 k_2 、 k_3 分别为MT1、MT2和MT3变压器的变比, u_α 、 u_β 分别为 α 、 β 牵引臂电压, u_A 、 u_B 、 u_C 为高压侧三相电网相电压, u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 为低压侧交流母线相电压, u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 为光伏逆变器三相相电压, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 为光伏逆变器相电流, i_A 、 i_B 、 i_C 为电网三相电流, i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 为低压交流母线三相电流, i_α 、 i_β 为牵引网 α 、 β 牵引臂电流, i_{ca} 、 i_{cb} 为光伏逆变器注入牵引臂的电流。 $i_{L\alpha}$ 、 $i_{L\beta}$ 分别为牵引网 α 、 β 臂的负载电流。

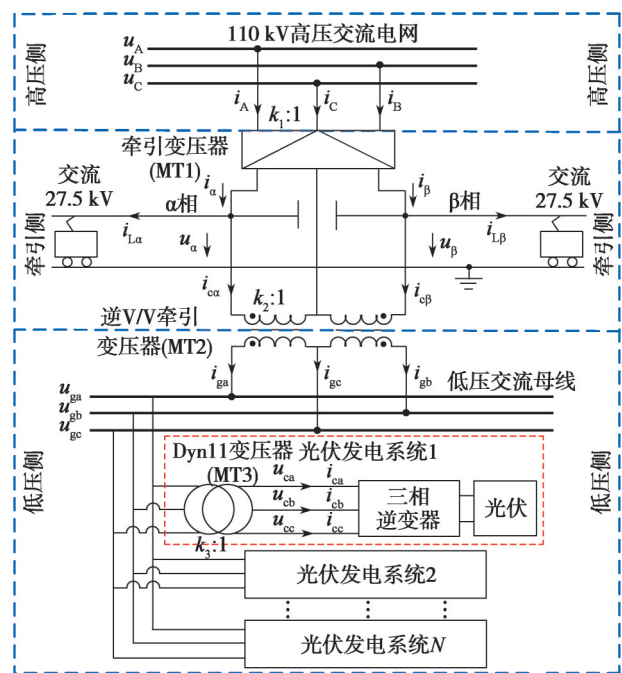


图1 系统拓扑结构

Fig. 1 System topology

根据图1所示的电压关系可得高压侧、牵引侧、低压侧交流电网电压关系可表示为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} -u_{CA} \\ u_{BC} \end{bmatrix} = k_2 \begin{bmatrix} -u_{gca} \\ u_{gbc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由式(1)可得,低压交流母线电压与高压侧线电压成正比,从而有

$$\begin{bmatrix} u_{gab} & u_{gbc} & u_{gca} \end{bmatrix}^T = \frac{1}{k_1 k_2} \begin{bmatrix} u_{AB} & u_{BC} & u_{CA} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

由式(2)可得, 低压交流母线也可以提供三相电压, 实现三相光伏逆变器在牵引侧的有效接入。同时, 由于Dyn11隔离变压器的存在, 低压交流母线电压的相位滞后于光伏逆变器侧相电压 30° , 同时低压交流母线电压幅值是光伏逆变器侧电压幅值的 k_3 倍。从而可得光伏逆变器侧电压与电流和低压交流母线电压与电流的关系如下:

$$\begin{bmatrix} u_{ca} & u_{cb} & u_{cc} \end{bmatrix}^T = \frac{1}{\sqrt{3} k_3} \begin{bmatrix} u_{gab} & u_{gbc} & u_{gca} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca} & i_{cb} & i_{cc} \end{bmatrix}^T = \sqrt{3} k_3 \begin{bmatrix} i_{gab} & i_{gbc} & i_{gca} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)可得, 光伏逆变器电压与高压侧三相电网电压的关系可写为

$$\begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3} k_1 k_2 k_3} \begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3} k_1 k_2 k_3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

由图1可得, 牵引臂电流由两部分组成: 一是机车在牵引臂上产生的机车负载电流, 二是光伏逆变器的并网电流。根据基尔霍夫电流定律, 牵引臂电流可以表示为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

则高压侧、牵引侧、光伏逆变器侧电流关系如下:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{3} k_1 k_2 k_3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可知, 高压侧三相电流由牵引负荷电流和光伏逆变器电流这两部分组成。由于牵引侧电流由电力机车决定, 而光伏逆变器具有灵活的电流控制能力, 在维持并网功率全额外送的前提下, 可通过输出负序电流补偿单相牵引负荷所需, 降低高压侧三相电网电压的不平衡度。同时, 光伏逆变器相电流与牵引负荷电流存在直接关联关系, 即通过相电流调节可直接供给对应桥臂牵引负荷所用。因此, 合理配置光伏逆变器受控相电流目标, 对完成光伏并网发电与负序补偿的统一控制至关重要。

2 控制策略

2.1 电流受控目标

为实现光伏并网发电和负序补偿, 光伏逆变器受

控电流目标将包括不对称电流目标、对称电流目标两部分, 则其可表示为

$$\begin{bmatrix} i_{caref} \\ i_{cbref} \\ i_{ccref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{caref_asy} \\ i_{cbref_asy} \\ i_{ccref_asy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{caref_sym} \\ i_{cbref_sym} \\ i_{ccref_sym} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: i_{caref} , i_{cbref} , i_{ccref} 为光伏逆变器相电流受控目标; i_{caref_asy} , i_{cbref_asy} , i_{ccref_asy} 为光伏逆变器不对称电流受控目标; i_{caref_sym} , i_{cbref_sym} , i_{ccref_sym} 为逆变器对称电流受控目标。

2.1.1 不对称电流受控目标

当牵引负荷位于 α 臂时, 光伏功率需通过低压交流母线的a、c相传输, 则a相和c相电流互为相反数, 且b相电流为零, 则流经低压交流母线的有功功率可表示为

$$P_g = u_{ga} i_{ga} + u_{gb} i_{gb} + u_{gc} i_{gc} = -u_{ga} i_{gc} + u_{gc} i_{gc} = u_{gca} i_{gc} \quad (9)$$

式中: P_g 为低压交流母线中的有功功率。

因为机车整流侧多运行在单位功率因数下, 一般可认为牵引功率仅含有功功率。根据式(9)可知, 低压交流母线侧相电流 i_{gc} 与线电压 u_{gca} 的相位相同, 则有

$$i_{gc} = I_{gm} \sin \theta_{gca} = I_{gm} \sin(\omega t + \varphi_{gca}) \quad (10)$$

式中: I_{gm} 为低压交流母线相电流幅值; θ 为相位; φ 为相位角。

从而有

$$P_g = U_{gm} I_{gm} \frac{1 - \cos(2\omega t + 2\varphi)}{2} = P_{g0} + P_{g2} \quad (11)$$

式中: U_{gm} 表示低压交流母线相电压幅值; P_{g0} 表示输出功率平均部分; P_{g2} 表示输出功率振荡部分。

因此, 低压交流母线c相电流幅值可表示为

$$I_{gm} = \frac{P_{g0}}{U_{gm}/2} \quad (12)$$

则低压交流母线三相电流瞬时值可表示为

$$\begin{bmatrix} i_{ga} & i_{gb} & i_{gc} \end{bmatrix}^T = \frac{P_{g0}}{U_{gm}/2} \begin{bmatrix} -\sin \theta_{gca} & 0 & \sin \theta_{gca} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

根据隔离变压器MT3电流关系, 可得光伏逆变器的不对称电流受控目标为

$$\begin{bmatrix} i_{caref_asy} \\ i_{cbref_asy} \\ i_{ccref_asy} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3} k_3}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} = \frac{-P_{LL\alpha}}{3U_{cm}/2} \begin{bmatrix} -\sin \theta_{cc} \\ -\sin \theta_{cc} \\ 2 \sin \theta_{cc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: $P_{LL\alpha}$ 为 α 臂牵引功率; U_{cm} 为逆变器相电压幅值, 具体计算见式(15)。

$$U_{cm} = U_{gm} / (\sqrt{3} k_3) \quad (15)$$

当牵引负荷位于 β 臂时, 光伏功率需通过低压交流母线的b、c相流入, 而a相电流为零。根据上述分析,

同理可得此时光伏逆变器不对称电流受控目标为

$$\begin{bmatrix} i_{\text{caref_asy}} \\ i_{\text{cbref_asy}} \\ i_{\text{ccref_asy}} \end{bmatrix} = \frac{-P_{\text{LL}\beta}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} -\sin\theta_{\text{cb}} \\ 2\sin\theta_{\text{cb}} \\ -\sin\theta_{\text{cb}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $P_{\text{LL}\beta}$ 为 β 臂牵引功率。

综合式(14)和式(16), 当 α 臂和 β 臂均有牵引负荷时, 光伏逆变器不对称电流受控目标可表示为

$$\begin{bmatrix} i_{\text{caref_asy}} \\ i_{\text{cbref_asy}} \\ i_{\text{ccref_asy}} \end{bmatrix} = \frac{-P_{\text{LL}\alpha}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} -\sin\theta_{\text{cc}} \\ -\sin\theta_{\text{cc}} \\ 2\sin\theta_{\text{cc}} \end{bmatrix} + \frac{-P_{\text{LL}\beta}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} -\sin\theta_{\text{cb}} \\ 2\sin\theta_{\text{cb}} \\ -\sin\theta_{\text{cb}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.1.2 对称电流受控目标

由于需要保持光伏逆变器直流电压恒定, 则有光伏逆变器输出有功功率平均值 P_{g0} 为

$$P_{g0} = 1.5U_{\text{cm}}I_{\text{cm}} \quad (18)$$

式中: I_{cm} 为光伏逆变器对称电流受控目标的幅值。

因此, 结合图1所示电流正方向, 光伏逆变器对称电流受控电流瞬时值也就是正序电流受控目标 $I_{\text{cm+}}$ 表示为

$$I_{\text{cm+}} = \frac{P_{g0}}{3U_{\text{cm}}/2} \quad (19)$$

然而, 这里需要指出, 式(17)给出的不对称电流受控目标同时含有正序、负序电流分量, 根据瞬时对称分量理论^[16], 可将式(17)改写为正负序分量的形式, 具体为

$$\begin{bmatrix} i_{\text{caref_asy}} \\ i_{\text{cbref_asy}} \\ i_{\text{ccref_asy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\text{caref+}} \\ i_{\text{cbref+}} \\ i_{\text{ccref+}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\text{caref-}} \\ i_{\text{cbref-}} \\ i_{\text{ccref-}} \end{bmatrix} = \frac{-P_{\text{LL}\alpha} - P_{\text{LL}\beta}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} \sin\theta_{\text{ca}} \\ \sin\theta_{\text{cb}} \\ \sin\theta_{\text{cc}} \end{bmatrix} + \left\{ \frac{-P_{\text{LL}\alpha}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} \sin\theta_{\text{cb}} \\ \sin\theta_{\text{ca}} \\ \sin\theta_{\text{cc}} \end{bmatrix} + \frac{-P_{\text{LL}\beta}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} \sin\theta_{\text{cc}} \\ \sin\theta_{\text{cb}} \\ \sin\theta_{\text{ca}} \end{bmatrix} \right\} \quad (20)$$

式中: $i_{\text{caref+}}, i_{\text{cbref+}}, i_{\text{ccref+}}$ 为光伏逆变器不对称电流受控目标的正序电流分量; $i_{\text{caref-}}, i_{\text{cbref-}}, i_{\text{ccref-}}$ 为光伏逆变器不对称电流受控目标的负序电流分量。

这里需要指出, 由于式(17)中已包含部分正序电流分量, 则在式(19)给出的光伏逆变器正序对称电流受控目标中需减去式(17)中所包含的正序对称电流, 同时根据图1所示电流正方向, 则光伏逆变器正序对称电流受控目标可表示为

$$\begin{bmatrix} i_{\text{caref_sym}} \\ i_{\text{cbref_sym}} \\ i_{\text{ccref_sym}} \end{bmatrix} = \frac{-P_{g0} + P_{\text{LL}\alpha} + P_{\text{LL}\beta}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} \sin\theta_{\text{ca}} \\ \sin\theta_{\text{cb}} \\ \sin\theta_{\text{cc}} \end{bmatrix} = I_{\text{cm+}} \begin{bmatrix} \sin\theta_{\text{ca}} \\ \sin\theta_{\text{cb}} \\ \sin\theta_{\text{cc}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: $I_{\text{cm+}}$ 为光伏逆变器输出的对称正序电流幅值。

由式(21)可知, 当 $I_{\text{cm+}} > 0$ 时, 表示不对称电流受控目标的正序分量不足以完全传输光伏功率所需的正序

电流, 此时对称电流受控目标指令为光伏功率所需正序电流的剩余的裕量; 当 $I_{\text{cm+}} < 0$ 时, 表示不对称电流受控目标的正序分量超过光伏功率所需的正序电流, 通过对称电流受控目标使之完全传输光伏功率所需的正序电流。因此, 根据上述分析, 兼顾并网发电和负序补偿的光伏逆变器混合电流受控目标可表示为

$$\begin{bmatrix} i_{\text{caref}} \\ i_{\text{cbref}} \\ i_{\text{ccref}} \end{bmatrix} = \frac{-P_{\text{LL}\alpha}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} -\sin\theta_{\text{cc}} \\ -\sin\theta_{\text{cc}} \\ 2\sin\theta_{\text{cc}} \end{bmatrix} + \frac{-P_{\text{LL}\beta}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} -\sin\theta_{\text{cb}} \\ 2\sin\theta_{\text{cb}} \\ -\sin\theta_{\text{cb}} \end{bmatrix} + \frac{-P_{g0} + P_{\text{LL}\alpha} + P_{\text{LL}\beta}}{3U_{\text{cm}}/2} \begin{bmatrix} \sin\theta_{\text{ca}} \\ \sin\theta_{\text{cb}} \\ \sin\theta_{\text{cc}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

2.2 系统实施

根据前述分析, 构造实施于三相静止坐标系的铁路牵引用光伏混合电流控制策略。图2给出了光伏逆变器混合电流控制结构图, 主要包括直流电压控制(direct voltage control, DVC)、混合电流目标生成(hybrid current reference generation, HCRG)、电流控制(current control, CC)3部分。

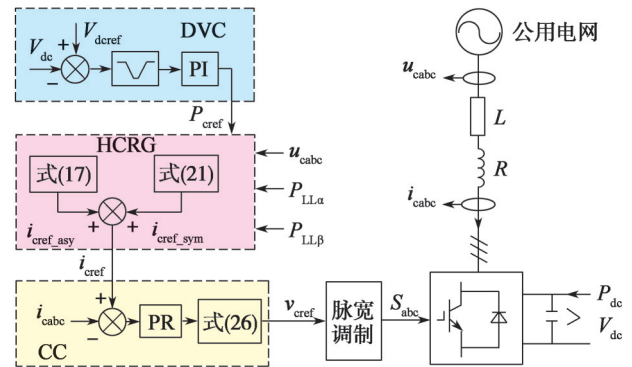


图2 光伏逆变器混合电流控制策略

Fig. 2 Hybrid current control strategy of photovoltaic inverter

本文所提出的混合电流控制策略的第1部分DVC环节, 采用了一种基于比例积分(PI)的直流电压控制回路, 输入直流电压和直流电压参考值。需要指出, 由于牵引负荷需要供给不对称电流, 这就不可避免导致光伏逆变器输出的有功功率存在二倍频波动, 进而导致光伏逆变器直流电压出现二倍频波动。为了避免此影响, 通常在直流电压控制环节中引入陷波器, 其表达式见式(23), 综上得到光伏逆变器参考功率 P_{cref} 如式(24)。

$$F(s) = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (23)$$

$$P_{\text{cref}} = F(s) \left[\left(k_{\text{vp}} + \frac{k_{\text{vi}}}{s} \right) \cdot (V_{\text{dcref}} - V_{\text{dc}}) \right] \quad (24)$$

式中: V_{dcref} 为直流参考电压; k_{vp} 和 k_{vi} 为比例参数和积分参数; ζ 为二倍频陷波器的阻尼系数, 一般为0.707。

HCRG 环节采用锁相环得到相电压的相位和幅值, 结合 DVC 得到的光伏逆变器功率参考值, 并根据式(17)完成不对称电流配置, 同时根据式(21)完成对称电流配置, 将二者相加即可得到光伏逆变器三相电流参考值, 如式(22)所示, 从而实现无需正序负序电流提取, 直接通过控制各相电流即可达到控制目的。

对于第3部分 CC 环节, 在三相静止坐标系中, 光伏逆变器调制电压 v_{ca} 、 v_{cb} 和 v_{cc} 为

$$\begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v'_{ca} \\ v'_{cb} \\ v'_{cc} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中: R 为等效电阻; v'_{ca} 、 v'_{cb} 、 v'_{cc} 为比例-谐振控制器的输出, 具体计算公式见式(26)。

$$\begin{bmatrix} v'_{ca} \\ v'_{cb} \\ v'_{cc} \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} i_{caref} - i_{ca} \\ i_{cbref} - i_{cb} \\ i_{ccref} - i_{cc} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中: i_{caref} 、 i_{cbref} 、 i_{ccref} 为光伏逆变器相电流受控目标; $G(s)$ 为电流传感器传递函数。

对于交流电流调节器而言, 由于比例-谐振控制器在谐振频率处可提供足够的幅值增益, 因此本文采用比例-谐振控制器作为交流电流调节器。同时, 为增强对外网频率偏差的适应性, 引入截止频率 ω_c 作为阻尼因子, 因此交流电流调节器的传递函数可表示为

$$G(s) = k_{ip} + \frac{k_{ir} \cdot 2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2} \quad (27)$$

式中: k_{ip} 和 k_{ir} 为比例参数和谐振参数; ω_c 为截止频率, 一般取 10 rad/s。

综上所述, 光伏逆变器混合电流控制策略实施于三相静止坐标系中, 通过构造由传输光伏功率所需的正序电流分量与补偿牵引负荷所需的负序电流分量的混合电流受控目标, 从而可在无需相序分离与提取的条件下完成对单相牵引负荷负序电流的补偿, 改善高压侧电网电能质量。

3 硬件在环测试

为了验证光伏并网混合电流控制策略的有效性, 团队在硬件在环仿真测试平台中搭建了如图1所示的光伏接入铁路牵引供电系统。其中, 主电路部分运行于 RTLAB OP5700 中, 光伏逆变器控制策略通过 NI PXIe-1071 实现, 具体结构如3所示。硬件在环测试中, 为证明控制策略的有效性, 采用 5 MW 的等效光伏逆变器替代所有光伏发电单元。由于本文关注光伏逆变器并网电流控制策略, 因此可采用恒功率源模拟完成最大功率追踪 (maximum power point tracking, MPPT) 功能的前端 DC/DC 变流器。具体参数详见表 1, 有关试验结果如图 4 和图 5 所示。

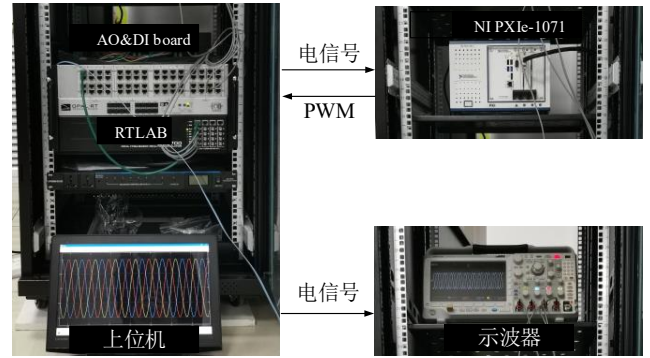


图3 硬件在环测试设置

Fig. 3 Hardware-in-loop test setup

表1 系统主要参数

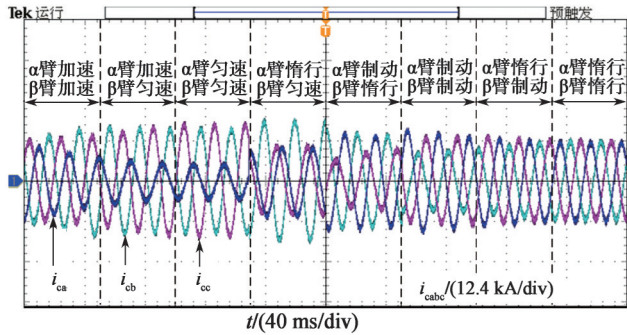
Table 1 Parameters for system

参数	数值	参数	数值
高压侧电网额定电压	110 kV	光伏逆变器额定容量	5 MVA
光伏逆变器额定电压	315 V	光伏逆变器直流侧电压	750 V
V/v 变压器(MT1)变比	110 kV/27.5 kV	开关频率	5 kHz
V/v 变压器(MT2)变比	27.5 kV/10 kV	滤波电感	0.15 mH
Dyn11 隔离变压器(MT3)变比	10 kV/310 V	直流侧电容	4.5 mF

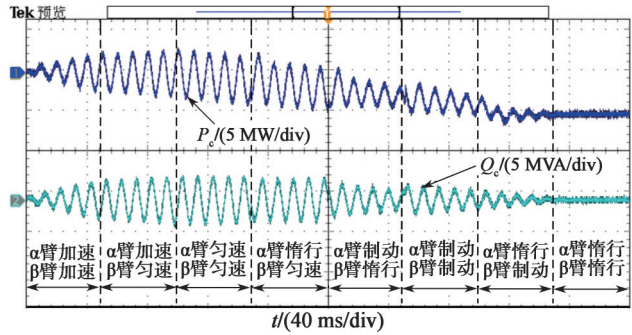
图 4 给出了 α 臂、 β 臂列车负荷经历加速、匀速、惰行、再生制动不同工况, 同时光伏逆变器有功功率保持 5 MW 不变, 光伏发电系统接入铁路牵引系统时, 其硬件在环试验结果。在图 4 中, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 分别为光伏逆变器 a 相、b 相、c 相电流, P_c 、 Q_c 分别为光伏侧瞬时有功、无功功率, i_{ABC} 表示高压电网侧三相电流, i_A 、 i_B 、 i_C 分别为高压电网侧 a 相、b 相、c 相电流, P 为高压电网瞬时有功功率, $P_{L\alpha}$ 、 $P_{L\beta}$ 分别为 α 臂、 β 臂牵引功率。牵引功率在 0~0.100 s 时不断增加, 并在 0.083 s 时达到 5 MW, 所以 0~0.083 s 时, 光伏有功功率大于牵引功率, 由式(24)可知, 此时对称电流为正, 光伏逆变器将剩余的功率输入到高压电网, 由于牵引功率不断增加, 所以此高压电网电流的幅值不断减小, 直至为 0, 如图 4(c) 所示。同时高压电网瞬时有功功率幅值也在逐渐减小, 如图 4(d) 所示。0.083 s 之后, 牵引功率仍在不断增加, 并在 0.100 s 达到最大值 5.5 MW, 0.100~0.150 s 牵引功率维持不变。由式(24)可得, 0.083 s 之后, 光伏功率不足以供给牵引负荷正序电流, 此时如图 4(d) 所示, 高压电网功率大于 0, 高压电网开始输出功率, 并在逐渐增加, 由高压电网与光伏逆变器一起供给牵引负荷正序电流, 之后电流幅值继续增加, 然后在 0.100~0.150 s 保持恒定, 如图 4(c) 所示。0.150 s 之后, 光伏功率大于牵引功率, 光伏逆变器继续向高压电网输入功率, 高压电网三相电流相位不变, 幅值如式(24)所示。在 0.150 s、0.200 s、0.250 s 时工况

改变,此时高压电网经历功率突变,如图4(d)。高压电网侧三相电流的幅值与光伏功率和牵引功率差值的绝对值有关,而相位与光伏功率和牵引功率差值的正负有关,即当光伏逆变器输出功率小于牵引负荷功率,

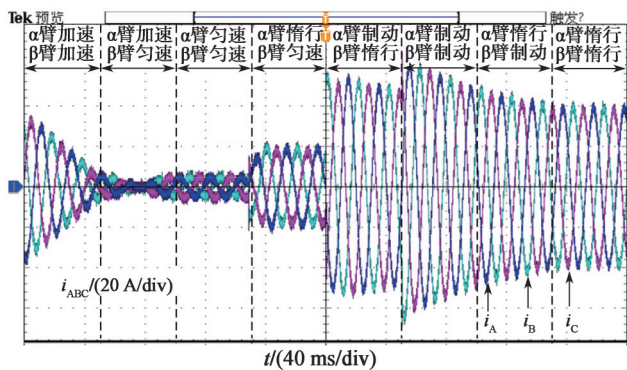
对值有关,而相位与光伏功率和牵引功率差值的正负有关,即当光伏逆变器输出功率小于牵引负荷功率,



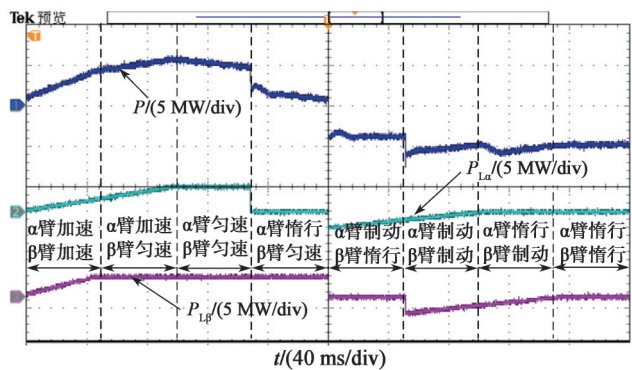
(a) 光伏逆变器相电流



(b) 光伏侧瞬时有功功率和无功功率



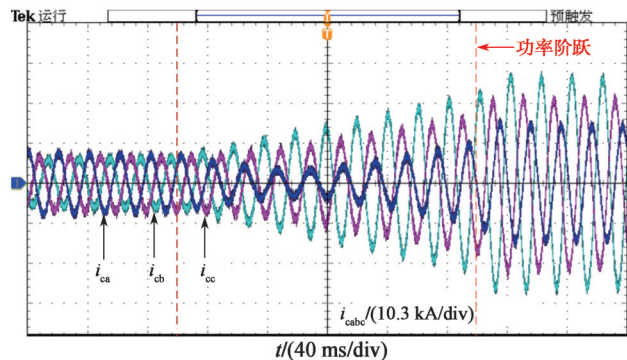
(c) 高压电网侧三相电流



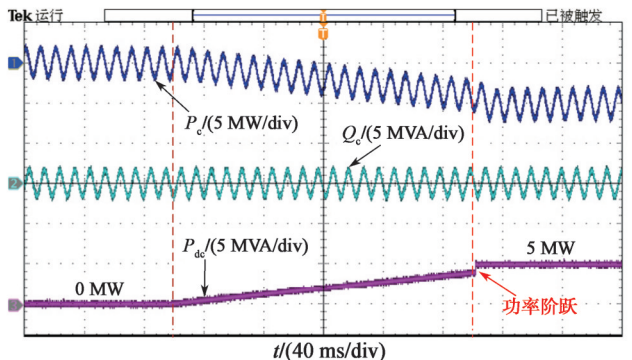
(d) 高压电网瞬时有功功率和牵引负荷功率

图4 牵引负荷变化工况试验结果

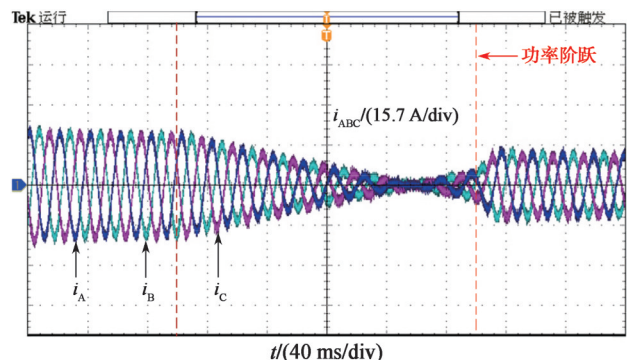
Fig. 4 Experimental results of traction load change conditions



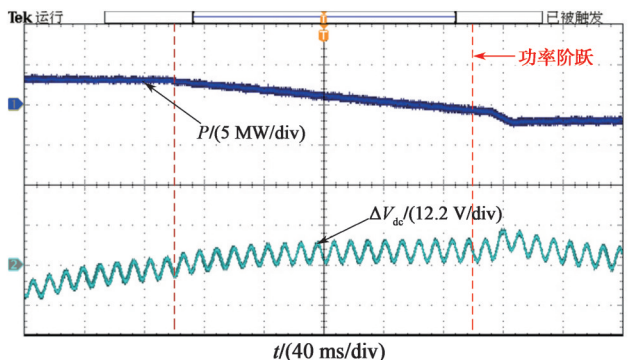
(a) 光伏逆变器相电流



(b) 光伏侧瞬时有功、无功功率和光伏MPPT功率



(c) 高压电网侧三相电流



(d) 高压电网瞬时有功功率和直流电压波动值

图5 光伏输出功率变化工况试验结果

Fig. 5 Experimental results of photovoltaic output power changing conditions

此时牵引供电系统功率存在差额, 则高压侧三相电流功率为正, 表示牵引供电系统需要从电网吸收功率; 当光伏逆变器输出功率大于牵引负荷功率, 此时牵引供电系统功率存在盈余, 则高压侧三相电流功率为负, 表示牵引供电系统向电网反馈功率。在夜间光伏补充功率为零时, 光伏逆变器三相电流仅包含用于补偿单相牵引负荷的负序电流, 而不包括传输光伏捕获功率的正序电流, 此时光伏逆变器仍可输出补偿单相牵引负荷所需的负序电流。

图5给出了光伏接入铁路牵引系统的硬件在环试验结果。在 α 臂牵引功率1 MW、 β 臂牵引功率2 MW不变时, 光伏逆变器有功功率变化如图5(b)所示。在图5中, P_{dc} 为光伏MPPT功率, ΔV_{dc} 为直流电压波动值, 其余符号含义同图4。由于光伏逆变器输出电流包括负序分量, 不可避免地导致其输出有功功率存在二倍频波动, 进而诱发光伏逆变器直流侧电压也出现二倍频波动, 其波动幅值约为 ± 5 V。0~0.100 s时, 光伏不输出有功功率, 此时由高压电网供给牵引负荷正序电流, 高压电网侧三相电流幅值不变; 0.100~0.300 s时, 光伏功率逐渐上升, 0.250 s达到3 MW。因此在0.100~0.250 s时, 由光伏逆变器和高压电网一起供给牵引负荷正序电流, 由于光伏逆变器功率逐渐增大, 高压电网输出功率不断减小, 0.250 s之后, 光伏功率大于牵引功率, 光伏功率将剩余功率输入给高压电网, 在0.250~0.300 s, 高压电网功率为负, 吸收光伏逆变器功率, 并且功率不断增大。光伏功率在0.300 s出现阶跃, 高压电网功率也出现了阶跃, 高压电网三相电流幅值突然增大。由图5(c)可得, 高压三相电流呈现三相对称形式, 降低了电流不平衡度。

4 结论

本文提出了面向铁路牵引供电网的光伏发电混合电流控制策略。通过在静止坐标系中生成电流受控目标, 从而可以在无需相序分离的情况下, 直接控制各相电流。同时, 该控制策略可以补偿牵引负荷所需的负序电流, 还可以传输光伏功率所需的正序电流, 从而实现光伏逆变器负序补偿与并网发电的双重控制目的。最后, 基于RTLAB平台验证了所提光伏发电混合电流控制策略的有效性。在下一步研究中, 将深入探索计及光伏逆变器容量限制的光伏发电统一并网同步控制。

参考文献:

[1] International Energy Agency. The future of rail: opportunities for energy and the environment [R/OL]. (2019-02-08) [2022-04-02]. <https://doi.org/10.1787/9789264312821-en>.

- [2] MANCINI F, NASTASI B. Solar energy data analytics: PV deployment and land use[J]. *Energies*, 2020, 13(2): 417.
- [3] CHENG Peng, LIU Wenquan, MA Jing, et al. Solar-powered rail transportation in China: potential, scenario, and case[J]. *Energy*, 2022, 245: 123221.
- [4] International Renewable Energy Agency. Global renewables outlook: energy transformation 2050[EB/OL]. (2020-04-01) [2022-04-02]. <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>.
- [5] 贾彦. 济青高铁实施国内首个“高铁+光伏”项目[J]. *山东国资*, 2018(增刊1): 83.
- JIA Yan. Jinan-Qingdao high speed railway implements the first "high speed railway + photovoltaic" project in China [J]. *State-Owned Assets of Shandong*, 2018(Suppl 1): 83.
- [6] D'ARCO S, PIEGARI L, TRICOLI P. Comparative analysis of topologies to integrate photovoltaic sources in the feeder stations of AC railways[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2018, 4(4): 951-960.
- [7] BOUDOUDOUH S, MAAROUFI M. Renewable energy sources integration and control in railway microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(2): 2045-2052.
- [8] CHENG Peng, KONG Huiwen, MA Jing, et al. Overview of resilient traction power supply systems in railways with interconnected microgrid[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 7(5): 1122-1132.
- [9] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(19): 5692-5702.
- DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong. Application of PV generation in AC/DC traction power supply system and the key problem analysis under the background of rail transit energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(19): 5692-5702.
- [10] BRENNAN M, FOIADELLI F, KALEYBAR H J. The evolution of railway power supply systems toward smart microgrids: the concept of the energy hub and integration of distributed energy resources[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2020, 8(1): 12-23.
- [11] CHENG Peng, KONG Huiwen, WU Chao, et al. Integrated configuration and control strategy of PV generation in railway traction power supply system[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020: 1-9.
- [12] 金涛, 沈学宇, 苏泰新, 等. 不平衡电网下并网逆变器的模型预测电流限幅灵活控制[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(11): 2342-2353.
- JIN Tao, SHEN Xueyu, SU Taixin, et al. Flexible model predictive control with peak current limitation for grid-connected inverter under unbalanced grid voltage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(11): 2342-2353.

- [13] 谭骞, 徐永海, 黄浩, 等. 不对称电压暂降情况下光伏逆变器输出电流峰值的控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 601-608.
TAN Qian, XU Yonghai, HUANG Hao, et al. A control strategy for peak output current of PV inverter under unbalanced voltage sags[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 601-608.
- [14] GRAUNGAARD TAUL M, WANG Xiongfei, DAVARI P, et al. Current reference generation based on next-generation grid code requirements of grid-tied converters during asymmetrical faults[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3784-3797.
- [15] JIA Jundi, YANG Guangya, NIELSEN A H. A review on grid-connected converter control for short-circuit power provision under grid unbalanced faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 649-661.
- [16] PAAP G C. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 522-528.