

电气化铁路牵引供电用光伏发电系统的接入拓扑及其电流控制策略

王轶欧

(中车工业研究院有限公司, 北京 100070)

摘要: 提出了电气化铁路牵引供电用光伏发电系统的接入拓扑及其电流控制策略。首先, 利用 V/V 变压器将两相牵引电压转换为与电网电压幅值、相位相同的三相电压, 为光伏发电系统的接入提供三相平衡电网环境。然后, 提出实施于三相静止坐标系中的分相电流控制策略。该策略利用相电流替代正、负序电流作为被控对象, 通过对相电流的闭环控制, 可在无需正、负序分离提取的条件下完成不对称与三相对称电流的注入, 实现光伏发电为牵引负荷供电的自发自用运行和为电网输送功率的全额上网双模式运行。最后, 仿真结果验证了所提出接入拓扑与电流控制策略的有效性。

关键词: 牵引供电; 光伏发电; 接入拓扑; 分相电流控制

中图分类号: TM 615 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0091-07

doi: 10.12177/emca.2020.142

Connection Topology and Current Control of PV Generation for Traction Power Supply in Electric Railway

WANG Yiou

(CRRC Academy, Beijing 100070, China)

Abstract: A connection topology and the corresponding current control strategy of photovoltaic (PV) generation for the traction power supply of electric railway are proposed. In this topology, a V/V transformer is used to convert two-phase traction voltage to three-phase voltage, which has the same amplitude and phase angle as the grid voltage. This can provide three-phase balanced voltage for the connection of PV generation. Then, an individual phase current (IPC) control strategy is designed in the three-phase stationary reference frame. In the proposed strategy, the phase current values are used as the controlled variables instead of the positive and negative sequence current components. Without any sequence extraction, it can flexibly inject both symmetrical and asymmetrical current by closed loop control of the phase current. In this way, the PV generation system can operate in two modes: one is the self-generation and self-consumption operation for supplying the locomotive, and the other is the grid-connection operation for feeding back to the grid. Finally, simulation results validate the effectiveness of the connection topology and the IPC control.

Key words: traction power supply; photovoltaic (PV) generation; connection topology; individual phase current control

0 引言

近年来, 以高速铁路为代表的电气化铁路快

速发展, 截止 2019 年底, 中国铁路总里程超 13.9 万公里, 其中高速铁路达 3.5 万公里。据统计^[1-2], 在铁路系统中, 电力消耗占据铁路系统全

收稿日期: 2020-07-28; 收到修改稿日期: 2020-09-08

作者简介: 王轶欧(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电气化轨道交通。

部能耗的 60% ~ 80%, 并随着电气化铁路里程的持续增加, 呈现逐年升高趋势。同时, 在全球能源清洁低碳发展的趋势下, 如何利用新能源实现电气化铁路牵引供电系统的节能减排就显得十分重要。

在新能源发电中, 光伏发电由于安装灵活、结构简单, 更适合应用于电气化铁路的集成应用, 特别是站房屋面、站台雨棚、铁路沿线等区域, 并已在杭州东站、济青高铁沿线建设实际工程^[3-4]。

现阶段, 光伏发电接入电气化铁路牵引供电系统最常用的方法是将其接入牵引变电站 110 kV (或 220 kV) 高压侧^[5-6]。然而, 由于光伏发电工作电压相对较低, 高压侧接入方案需经过多级高变比的升压变换, 导致电量损耗和系统建设成本的增加。为此, 文献[7-8]提出了基于单相双端口背靠背变流器的光伏发电接入电气化铁路牵引供电的方案, 其中光伏组件通过 DC/DC 变流器接入单相背靠背变流器的公用直流侧。该方案接入电压较低、能量传递路径较短, 可降低整个光伏并网系统成本, 并减少功率传输损耗。但会导致高压侧的电流不平衡以及瞬时功率二倍频振荡, 不利于并网点处的电压平衡。为了确保三相平衡电流注入, 需协同双端口间的有功、无功功率控制, 但这会在双交流端口间产生无功环流, 增加了额外损耗。

为了降低铁路牵引负荷所产生的电流不平衡, 借鉴多功能变流器的概念^[9-11], 令光伏逆变器以有利于系统平衡的方式运行: 当存在牵引负荷时, 光伏逆变器以不对称电流注入方式, 将全部功率供给牵引负荷, 实现光伏功率在牵引侧全部自用; 当不存在牵引负荷时, 光伏逆变器以对称电流注入方式, 将全部功率馈送至高压侧电网, 实现光伏功率在电网侧全额上网。为了完成上述目标, 光伏逆变器的指令电流配置就显得十分关键。文献[12-14]根据瞬时功率理论, 提出了平衡电流注入^[12]、直流电压波动平抑^[13]、功率波动平抑^[14]等场景下的变流器指令电流配置方案。然而, 这些研究多从电网和变流器的需求出发, 但却没有关注负荷需求, 难以适用于电气化铁路单相牵引负荷的供电实际。

本文首先提出了电气化铁路牵引供电用光伏发电的三相接入拓扑, 并以此为基础, 提出实施于

三相静止坐标系的分相电流控制策略。该策略以相电流替代序电流作为被控对象, 可在无需正、负序分离提取的条件下完成对称与不对称电流的并网输出, 实现光伏发电为牵引负荷供电的自发自用和为电网馈送功率的全额上网的双模式运行。最后, 通过仿真研究, 验证了所提接入拓扑和分相电流控制的有效性。

1 光伏发电的三相接入拓扑

在牵引变电站中, 高压侧三相电经过牵引变压器转变为两路 27.5 kV 单相电, 以实现两侧独立供电臂供电。其中, V/V 牵引变压器由于结构简单、容量利用率高等因素, 而得到了广泛应用。以 V/V 牵引变压器为例, 电气化铁路牵引供电用光伏发电的三相接入拓扑如图 1 所示。

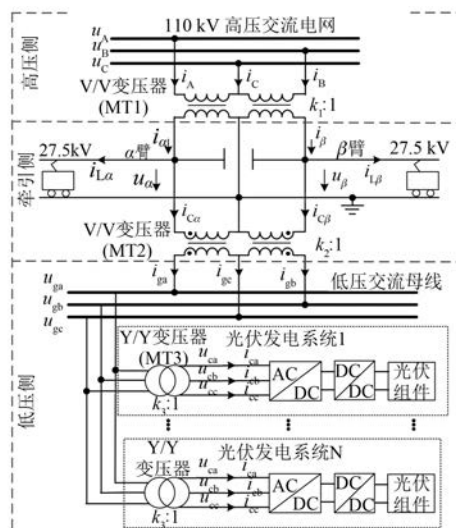


图1 系统拓扑结构

图1中, u_A 、 u_B 、 u_C 为电力系统高压侧三相电压, i_A 、 i_B 、 i_C 为电力系统高压侧三相电流, u_α 、 u_β 为牵引侧两相电压, i_α 、 i_β 为两牵引臂电流, i_{La} 、 i_{Lb} 为两牵引臂的牵引负荷电流, i_{Ca} 、 i_{Cb} 为光伏注入牵引臂的电流, u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 为低压交流母线三相电压, u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 为光伏逆变器三相电压, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 为光伏逆变器三相电流。

在所提三相接入方案中, 利用 1 台降压 V/V 变压器 (MT2) 将两相 27.5 kV 牵引电压转变为 10(6) kV 三相电压, 并构造低压交流母线, 以便于接入更多的三相光伏发电系统。由于 V/V 变压器无法提供中性点, 则为构造低压交流母线

的中性点,本文采用三相 Y/Y 变压器(MT3)作为光伏逆变器的隔离降压变压器,并可采用常规三相逆变器,替代单相接入方案中单相背靠背变流器^[7-8],而无需对光伏逆变器结构进行特殊设计,具有产品匹配度高、方案实施便捷等优势。

因为本文重点关注高压侧、低压侧和光伏逆变器侧的电压和电流瞬时值关系,所以可采用理想变压器模型以简化建模流程。

在电压方面,根据图 1 所给出的接入拓扑,高压侧、牵引侧、低压侧以及光伏逆变器电压间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = k_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = k_2 k_3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 分别为牵引 V/V 变压器(MT1)变比、低压侧 V/V 变压器变比(MT2)变比和 Y/Y 隔离变压器(MT3)变比。

由于 Y/Y 三相隔离变压器的应用,在低压侧不存在零序电流回路,而无法在低压侧和光伏逆变器侧感应产生零序电压。假定高压侧电网电压为三相无零序平衡电压,则高压侧和光伏逆变器三相电压可表示为

$$\begin{cases} u_{ca} + u_{cb} + u_{cc} = 0 \\ u_A + u_B + u_C = 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1)~式(3),光伏逆变器电压可表示为

$$\begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1 k_2 k_3} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(4)可知,光伏逆变器电压瞬时值正比于高压侧电网三相电压瞬时值,其电压幅值、频率、相位特征与高压侧电网三相电压相同。因此,采用图 1 所给出的三相接入结构,可为光伏逆

变器的接入提供与高压侧电网电压幅值、相位相同的并网接入环境。

在电流方面,高压侧、牵引侧、低压侧以及光伏逆变器电流间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{k_2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} = \frac{1}{k_2 k_3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据图 1 可知,牵引臂电流、牵引负荷电流以及光伏逆变器注入牵引侧电流间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据式(5)~式(7)可知,高压侧三相电流、牵引负荷电流与光伏逆变器电流间的数学表达式可写为

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{k_1 k_2 k_3} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

可知,高压侧电网三相电流由牵引负荷电流和光伏逆变器电流共同决定。由于电气化列车为单相负荷,将不可避免地在高压侧产生负序电流,则可令光伏逆变器以有利于电网平衡的模式运行:当存在牵引负荷时,光伏逆变器通过以“自发自用”模式运行,通过不对称电流输出形式将全部功率供给牵引负荷;当不存在牵引负荷时,光伏逆变器以“全额上网”模式运行,通过对称电流输出形式将全部功率馈送至高压侧电网。

2 分相电流控制策略

2.1 相电流指令配置

为了实现光伏发电的双模式运行,光伏逆变器需根据牵引负荷情况灵活调控其输出电流。因此,如何配置光伏逆变器相电流指令,就显得十分关键。

根据瞬时功率理论,光伏逆变器有功、无功功率可表示为

$$\begin{cases} P_c = u_{ca} i_{ca} + u_{cb} i_{cb} + u_{cc} i_{cc} \\ Q_c = (u_{cb} i_{ca} + u_{ca} i_{cb} + u_{ab} i_c) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_c 、 Q_c 为光伏逆变器有功、无功功率; u_{cb} 、 u_{cac} 、 u_{cab} 为光伏逆变器侧线电压。

假定牵引负荷由 α 臂供电, 则光伏逆变器输出功率需全部经由 A 相和 C 相输送至 α 供电臂, 而 B 相无电流。在这种模式下, 光伏逆变器输出电流可表示为

$$\begin{cases} i_{ca} = -i_{cc} \\ i_{cb} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据式 (10), 光伏逆变器有功、无功功率表达式可简化为

$$\begin{cases} P_c = (u_{ca} - u_{cc}) i_{ca} = u_{cac} i_{ca} \\ Q_c = \sqrt{3} u_{cb} i_{ca} \end{cases} \quad (11)$$

现代电气化列车车载整流器采用 PWM 整流器, 可运行于单位功率因数模式, 而不消耗无功功率。因此, 光伏逆变器只需提供有功功率。根据式 (11) 可知, 光伏逆变器 C 相电流相位与 AC 相间的线电压相同, 超前于 B 相电压 90° , 则光伏逆变器 C 相电流可表示为

$$i_{ca} = I_{\text{cref}} \frac{u_{cac}}{\sqrt{3} U_{\text{cm}}} \quad (12)$$

式中: I_{cref} 为电流幅值, 由光伏逆变器输出的平均有功功率决定; U_{cm} 为光伏逆变器相电压幅值。

假定线电压 u_{cac} 的相位为 φ , 则光伏逆变器有功功率可表示为

$$\begin{aligned} P_c &= u_{cac} I_{\text{cref}} \frac{u_{cac}}{\sqrt{3} U_{\text{cm}}} = \sqrt{3} U_{\text{cm}} I_{\text{cref}} \sin^2(\omega t + \varphi) = \\ &\sqrt{3} U_{\text{cm}} I_{\text{cref}} \frac{1 - \cos(2\omega t + 2\varphi)}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

可见, 在不对称电流注入模式下, 光伏逆变器输出有功功率呈现平均分量与二倍频分量共存的形式。由于光伏逆变器需要保持直流侧平均电压跟踪其目标指令, 则交流侧输出平均有功功率与直流侧输入功率相等, 光伏逆变器输出电流幅值为

$$I_{\text{cref}} = \frac{P_{\text{cdc}}}{\sqrt{3} U_{\text{cm}} / 2} \quad (14)$$

式中: P_{cdc} 为光伏逆变器直流侧馈入功率。

因此, 根据式 (10)、式 (12) 和式 (14), 光伏逆变器三相电流指令可表示为

$$\begin{cases} i_{\text{caref}} = \frac{P_{\text{cdc}}}{\sqrt{3} U_{\text{cm}}^2 / 2} u_{cac} \\ i_{\text{cbref}} = 0 \\ i_{\text{ccref}} = -\frac{P_{\text{cdc}}}{\sqrt{3} U_{\text{cm}}^2 / 2} u_{cac} \end{cases} \quad (15)$$

为了便于指令计算和对比分析, 建立以光伏逆变器相电压幅值作为电压基准值, 以光伏逆变器线电流幅值作为电流基准值的标么值系统, 则功率基准值可表示为

$$P_b = 3 \frac{U_b}{\sqrt{2}} \frac{I_b}{\sqrt{2}} = 3 \frac{U_{\text{cm}}}{\sqrt{2}} \frac{I_{\text{cm}}}{\sqrt{2}} = 1.5 U_{\text{cm}} I_{\text{cm}} \quad (16)$$

在此标么值系统下, 光伏逆变器三相电流指令可改写为

$$\begin{cases} i_{\text{caref}^*} = P_{\text{cdc}^*} u_{\text{cac}^*} \\ i_{\text{cbref}^*} = 0 \\ i_{\text{ccref}^*} = -P_{\text{cdc}^*} u_{\text{cac}^*} \end{cases} \quad (17)$$

式中: 下标 * 表示标么值。

可见, 光伏逆变器 A 相和 C 相电流幅值与直流侧输入功率呈正比, 但二者相位相反, 其中 A 相电流与 AC 相间线电压的相位相同, C 相电流与 AC 相间线电压相反。

当牵引负荷由 β 臂供电, 则光伏逆变器输出功率需全部经由 B 相和 C 相输送至 β 供电臂, 而 A 相无电流。根据上述分析, 光伏逆变器三相电流指令可表示为

$$\begin{cases} i_{\text{caref}^*} = 0 \\ i_{\text{cbref}^*} = P_{\text{cdc}^*} u_{\text{cbc}^*} \\ i_{\text{ccref}^*} = -P_{\text{cdc}^*} u_{\text{cbc}^*} \end{cases} \quad (18)$$

当电气化列车行驶于电分相或不在此牵引变电站供电区间内, α 与 β 臂均无牵引负荷, 则光伏逆变器需要注入三相对称有功电流。在维持其直流侧电压稳定的前提下确保提供三相对称的并网电流, 则光伏逆变器三相电流指令可表示为

$$\begin{cases} i_{\text{caref}} = I_{\text{cref}} \cdot u_{ca} / U_{\text{cm}} \\ i_{\text{cbref}} = I_{\text{cref}} \cdot u_{cb} / U_{\text{cm}} \\ i_{\text{ccref}} = I_{\text{cref}} \cdot u_{cc} / U_{\text{cm}} \end{cases} \quad (19)$$

由于交流侧输出平均功率与直流侧输入功率相等, 光伏逆变器的电流幅值可写为

$$I_{\text{cref}} = \frac{P_{\text{cdc}}}{3 U_{\text{cm}} / 2} \quad (20)$$

根据式(19)和式(20),在所述标么值系统中,光伏逆变器的电流指令可写为

$$\begin{cases} i_{\text{caref} *} = P_{\text{cdc} *} u_{\text{ca} *} \\ i_{\text{cbref} *} = P_{\text{cdc} *} u_{\text{cb} *} \\ i_{\text{ccref} *} = P_{\text{cdc} *} u_{\text{cc} *} \end{cases} \quad (21)$$

因此,根据牵引负荷情况的差异,可灵活配置光伏逆变器电流指令,完成运行模式间的切换:(1)当 α 臂存在牵引负荷时,光伏逆变器相电流指令可按式(17)进行配置,全部光伏功率经由AC两相输送至 α 臂供给牵引负荷所用;(2)当 β 臂存在牵引负荷时,光伏逆变器相电流指令可按式(18)进行配置,全部光伏功率经由BC两相输送至 β 臂供给牵引负荷所用;(3)当两臂均无牵引负荷时,光伏逆变器相电流指令按式(21)进行配置,全部光伏功率经ABC三相馈送至电网。

2.2 相电流指令跟踪

对于图1所给出的双级式光伏发电系统而言,前级DC/DC变流器执行最大功率追踪控制,后级DC/AC变流器则需维持直流母线电压的恒定,并输出相应的功率^[14],则光伏逆变器有功功率指令可表示为

$$P_{\text{cdc} *} = \left(k_{\text{vp}} + \frac{k_{\text{vi}}}{s} \right) \cdot (U_{\text{dc} \text{ref} *} - U_{\text{dc} *}) \quad (22)$$

式中: k_{vp} 、 k_{vi} 为直流电压调节器的比例系数、积分系数; $U_{\text{dc} \text{ref} *}$ 、 $U_{\text{dc} *}$ 分别为光伏逆变器直流侧电压指令和测量值。

当光伏逆变器以不对称电流输出时,光伏逆变器输出的有功功率呈现平均直流分量与二倍频交流分量的形态。由于交直流两侧瞬时功率的不平衡,光伏逆变器直流侧电压存在二倍频波动,并经过直流电压闭环传递至有功功率,令光伏逆变器有功功率呈现平均分量与二倍频波动分量共存的形式,进而导致其输出电流出现严重谐波畸变。为高正弦度正弦电流输出,可利用二倍频陷波器滤除光伏逆变器有功功率指令中的二倍频交流分量,以获取用于电流指令配置、且与直流侧馈入功率相等的平均功率 $P_{\text{cdc} *}$,则其传递函数为

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

式中: ξ 为阻尼系数, $\xi=0.707$ 。

结合式(17)、式(18)和式(21),即可获取光伏逆变器呈现交变特性的相电流指令,则需构造

可实现对交流信号无静差跟踪的电流调节器。因此,本文采用比例谐振(PR)控制器作为电流调节器。考虑到数字处理引入的截断误差和舍入误差,可引入截止频率 $\omega_c = 5 \sim 20 \text{ rad/s}$,则PR控制器的可写为

$$G(s) = k_{\text{ip}} + \frac{k_{\text{ir}} \cdot 2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \quad (24)$$

式中: k_{ip} 、 k_{ir} 为比例系数、谐振系数; ω_c 为截止频率, $\omega_c = 10 \text{ rad/s}$ 。

根据两电平电压源变流器数学模型,可知光伏逆变器的交流侧输出电压为

$$\begin{bmatrix} u_{\text{a} *} \\ u_{\text{b} *} \\ u_{\text{c} *} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\text{ca} *} \\ u_{\text{cb} *} \\ u_{\text{cc} *} \end{bmatrix} - R_* \begin{bmatrix} i_{\text{ca} *} \\ i_{\text{cb} *} \\ i_{\text{cc} *} \end{bmatrix} - G(s) \begin{bmatrix} i_{\text{caref} *} - i_{\text{ca} *} \\ i_{\text{cbref} *} - i_{\text{cb} *} \\ i_{\text{ccref} *} - i_{\text{cc} *} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中: $u_{\text{a} *}$ 、 $u_{\text{b} *}$ 、 $u_{\text{c} *}$ 为光伏逆变器交流侧输出三相电压; R_* 为等效线路电阻。

综上所述,电气化铁路牵引供电用光伏发电系统分相电流控制结构图如图2所示。

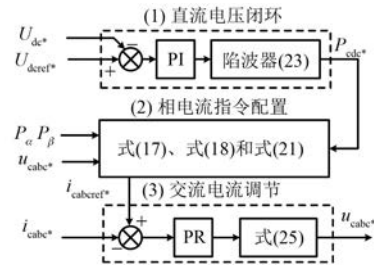


图2 控制结构图

可见,控制系统主要由直流电压闭环、电流指令配置、交流电流闭环3部分构成。其中:(1)直流电压闭环通过PI调节器与二倍频陷波器的级联,提供光伏逆变器平均功率指令,实现直流侧平均电压的稳定控制;(2)相电流指令配置利用式(17)、式(18)和式(21),结合平均功率指令确定光伏逆变器三相交流电流指令,实现对称与不对称电流指令的灵活配置;(3)交流电流调节利用PR控制器,调节光伏逆变器输出电流,完成对目标电流指令的无静差跟踪控制。

在所提控制策略中,光伏逆变器利用相电流替代序电流作为被控量,可在无需正、负序分离提取的条件下,完成对称与不对称电流的注入,简化了控制系统实施流程。

3 仿真实验

为了验证所提出的光伏逆变器分相电流控制策略有效性,根据图 1 给出的接入拓扑进行 MATLAB 仿真研究。在光伏逆变器中,前级 DC/DC 变流器通过最大功率追踪控制向后级 DC/AC 逆变器直流侧注入有功功率,因为本文重点关注后级 DC/AC 的并网控制策略,所以采用恒功率源替代前级 DC/DC 变流器向直流侧注入功率,并采用单台 5.0 MW 的等值模型进行仿真研究。在牵引侧,考虑到现代电气化列车车载整流器运行于单位功率因数模式,不消耗无功功率,则可利用单相阻性负荷替代电力机车牵引负荷。为了方便对比分析,仿真结果均用标么值形式表示,其中电压基准值为额定相电压幅值,功率基准值为 5 MW,如表 1 所示。

表 1 系统参数	
参数名称	参数值
高压侧电网电压/kV	110
V/V 变压器 MT1 变比/(kV/kV)	110/27.5
V/V 变压器 MT1 变比/(kV/kV)	27.5/10
Y/Y 变压器 MT3 变比/(kV/V)	10/315
光伏逆变器容量/MW	5
光伏逆变器额定电压/V	315
光伏逆变器直流侧电压/V	1 000
牵引负荷/MW	10.0

表 2 给出了牵引负荷变化情况。在 0~0.2 s,牵引负荷由 α 臂供电,即 $P_{L\alpha} = 2$ p.u.、 $P_{L\beta} = 0$ p.u.;在 0.2~0.4 s,电力机车处于电分相区间, α 与 β 臂均无牵引负荷,即 $P_{L\alpha} = 0$ p.u.、 $P_{L\beta} = 0$ p.u.;在 0.4~0.6 s,牵引负荷由 β 臂供电,即 $P_{L\alpha} = 0$ p.u.、 $P_{L\beta} = 2$ p.u.。

表 2 牵引负荷变化情况		
时间/s	α 臂功率/(p.u.)	β 臂功率/(p.u.)
0~0.2	2	0
0.2~0.4	0	0
0.4~0.6	0	2

图 3 给出了在牵引负荷变化下光伏逆变器侧电压仿真结果。其中,假定高压侧电网的三相电压平衡,短路比为 10。可见,在牵引负荷变化时,光伏逆变器的三相电压平衡,其幅值、相位与电网电压相同。因此,采用本文所提出的基于 V/V 变压器的接入拓扑,可将牵引侧两相电压转换为三

相平衡电压,并且其幅值、相位与高压侧三相电压相同,为光伏逆变器接入提供了三相平衡并网接入环境。

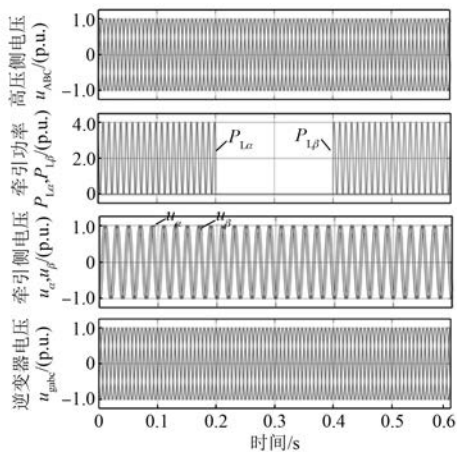


图 3 光伏逆变器侧电压和功率仿真结果

图 4 给出了牵引负荷变化下光伏逆变器侧电压电流和功率仿真结果。其中,高压侧电网环境与图 3 相同,光伏逆变器输出的平均有功、无功功率设置为 1.0、0 p.u.。由于高压侧电流正方向指向牵引负荷侧和光伏逆变器侧,则 $P > 0$ 表示牵引供电系统从电网吸收有功功率, $P < 0$ 表示牵引供电系统向电网注入有功功率, $P_c < 0$ 表示光伏逆变器输出有功功率。在 0~0.2 s 和 0.4~0.6 s 内,由于牵引负荷的存在,光伏逆变器运行于自发自用模式,通过输出不对称电流,令其功率经特定两相线传递至牵引负荷。在这 2 种工况下,光伏逆变器电流幅值达到 1.7 p.u.。由于不对称电流注入,光伏逆变器瞬时有功、无功功率存在幅值为 1.0 p.u.的二倍频波动,并且其直流侧电压也存在 ± 18 V 的二倍频波动,但光伏逆变器直流侧平均电压、交流侧平均功率仍可实现对目标指令的有效跟踪。然而,由于牵引负荷相对较大,光伏逆变器无法满足全部功率需求,差额的 1.0 p.u.有功功率仍需由高压侧电网提供,高压侧电网会出现电流三相不平衡以及功率二倍频波动。在 0.2~0.4 s 内,由于两牵引臂均不存在牵引负荷,光伏逆变器运行于全额上网模式,通过输出三相对称电流,令其功率经过 ABC 三相传递至电网侧,实现光伏功率的全额上网。在此工况下,光伏逆变器电流幅值降低为 1.0 p.u.。原因是在全额上网模式下,全部光伏功率通过三相线以相电压传递;

在自发自用模式下,全部光伏功率通过特定的两相线以线电压传递。即在相同传输功率的前提下,光伏逆变器在自发自用模式下输出电流幅值是在全额上网模式下电流幅值的 $\sqrt{3}$ 倍。

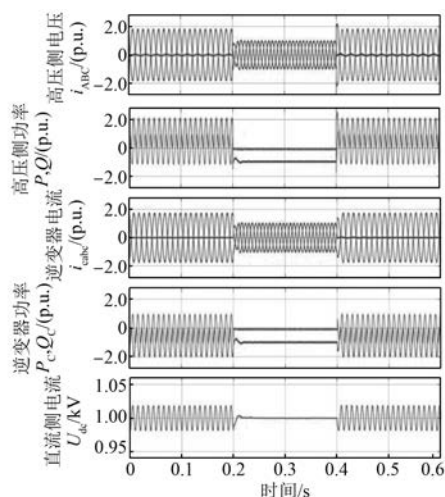


图4 光伏逆变器侧电压电流和功率仿真结果

根据上述仿真结果可知,所提接入拓扑可为光伏发电系统的并网提供三相对称接入环境,而分相电流控制可灵活输出对称与不对称电流,实现光伏逆变器自发自用和全额上网的双模式运行。

4 结 语

本文提出了一种基于V/V变压器的光伏发电系统三相接入拓扑及其分相电流控制策略。该拓扑利用V/V变压器将两相牵引电压转换为三相电,并构造三相交流低压母线,以便于光伏发电系统的接入。所提分相电流控制策略,以相电流替代序电流作为被控量,通过对每相电流的控制,可在无需正、负序分离的条件下输出对称与不对称电流,实现了光伏发电的自发自用和全额上网的双模式运行,并通过仿真验证了所提接入拓扑与控制策略的有效性。

【参考文献】

[1] International Energy Agency. The future of rail: opportunities for energy and the environment [R]. Paris, IEA, 2019.

[2] 周新军. 铁路利用新能源和可再生能源潜力分析[J]. 中外能源, 2016, 21(5): 29.

[3] 雷军. 杭州东站 10 MWp 光伏建筑一体化示范项目简介[J]. 建筑电气, 2014, 33(3): 31.

[4] 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.

[5] 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.

[6] YOO B, PARK C, LEE J. A study on design of photovoltaic system using electrical railway stations [C] // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.

[7] 陈维荣, 王璇, 李奇, 等. 光伏电站接入轨道交通牵引供电系统发展现状综述[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3663.

[8] 郭明亮, 戴朝华, 邓文丽, 等. 电气化铁路背靠背光伏发电系统及控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 541.

[9] 程鹏, 马静, 李庆, 等. 风电机组电网友好型控制技术要点及展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 456.

[10] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1.

[11] JIA J, YANG G, 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.

[12] 程启明, 郭凯, 程尹曼, 等. 电网电压不平衡时DFIG网侧变流器新型双环控制策略[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(12): 35.

[13] CHENG P, NIAN H. Direct power control of voltage source inverter in a virtual synchronous reference frame during frequency variation and network unbalance[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(3): 502.

[14] 齐飞, 李建文, 张舒怡, 等. 基于LCL滤波器的光伏并网复合控制策略[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(1): 48.