

一种降低高铁牵引供电系统负序电流的光伏发电接入方法

夏焰坤^{1,2}

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:光伏发电是一种绿色节能的发电技术,近年来在电力系统中得到大力发展,但在牵引供电系统中尚未有工程应用。针对光伏接入牵引供电系统的情况,提出了一种利用光伏能源来降低牵引供电系统负序的方法。根据牵引系统供电臂负荷电流差值选择光伏接入方式,理论分析了改善牵引供电系统负序的基本原理,提出了相应的控制方法。针对不同的负荷情况,在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建了电气仿真模型进行分析,仿真结果表明:所提方法和控制策略能有效改善牵引供电系统负序电流问题。

关键词:光伏;负序;铁路;牵引供电系统;控制

中图分类号:TM 315 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0062-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210412

A Photovoltaic Generation Access Method to Reduce Negative Sequence Current of High-speed Railway Traction Power Supply System

Xia Yankun^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University,

Chengdu 610039, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Photovoltaic (PV) generation is a green energy-saving power generation technology that has been vigorously developed in power system in recent years, but there is no engineering application in traction power supply system. Aiming at the situation of photovoltaic access traction power supply system, a method of using photovoltaic energy to improve the negative sequence of traction power supply system is proposed. According to the load current difference of power supply arm of traction system, theoretical analysis is used to select the photovoltaic access method and to improve the basic principle of the negative sequence of traction power supply system, and then the corresponding control method is proposed. According to different load conditions, the electrical simulation model is built on the Matlab/Simulink simulation platform. The simulation results show that the proposed method and control strategy can effectively improve the negative sequence problem of traction power supply system.

Key words: photovoltaic; negative sequence; railway; traction power supply system; control

0 引言

牵引供电系统是高速铁路电力机车的唯一供电来源,其供电质量水平一方面会对机车安全可靠运行带来影响,另一方面也会对三相供电系统造成影响^[1-5]。目前高速铁路主要的电能质量问题在于单

相大功率牵引负荷造成的三相供电系统的不平衡,即负序问题^[6-12]。

光伏发电^[13]作为一种绿色、节能的新能源发电技术,在全世界电力系统中得到广泛应用。传统的光伏发电领域研究主要关注点在三相电力系统,而随着高速铁路的快速发展,牵引供电系统伴随铁路线路的延伸也发展成一个非常庞大的供电网络。在日照充足的地区,如果能够将光伏能源引入到牵

引供电系统将会对提高牵引供电系统的绿色、环保水平。为加快铁路行业应用新能源技术,铁道部门制定了多项相关规范,相关的研究报告和工程实际应用相对较少。如何有效利用光伏电能,必将成为牵引供电系统一个重要的课题。

文献[14]研究了在全电力电子化的独立贯通牵引供电系统的直流母线中接入新能源的构想,用于综合能源利用,但其主要适用于未来贯通供电系统。文献[15]提出了一种光伏接入方案,但未考虑牵引供电系统三相-单相供电结构的特殊性,未能合理利用光伏接入电能来改善牵引供电系统自身的问题。为此,从牵引供电系统不对称供电结构角度出发,以平衡接线牵引变压器牵引变电所为例,提出了一种既能充分利用光伏电能,又能有效改善牵引供电系统负序的光伏接入方法。

首先,提出了一种光伏接入方法;其次,分析了负序改善原理,并提出了变流器控制策略;最后,在仿真平台上搭建了模型进行验证,论证所提方法的有效性。

1 光伏接入方案结构

以平衡接线牵引变压器变电所为例,系统结构如图 1 所示。三相电网电压经过三相-两相平衡变压器对称变换成 α, β 两单相电压。光伏发电系统电池组件采用集中接入的方式,其直流母线通过两组单相变流器分别与 α, β 两相供电臂相连,实现并网。

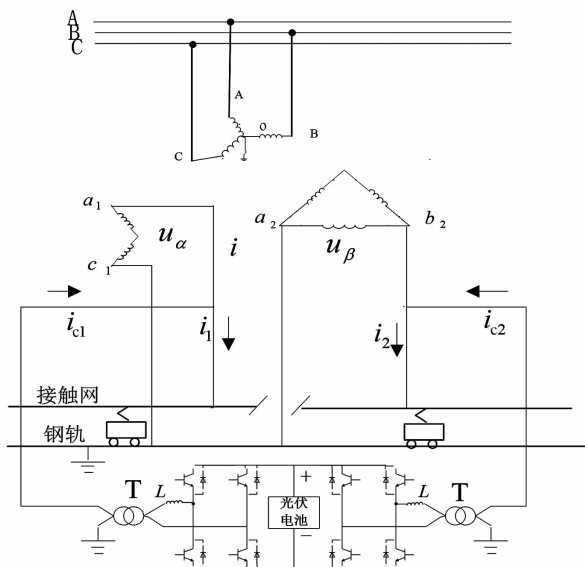


图 1 光伏接入牵引供电系统方案

两组变流器安装容量相同,但其每组变流器馈入供电臂的电流需要根据负荷情况进行合理分配。并网变流器需要检测 α, β 两相牵引负荷的电流或功率大小,与自身输出电流或功率进行比较,经过分析判断,计算出反馈给 α, β 两相的并网电流或功率。图 1 中 T 为升压变压器,起到隔离和升压作用。

2 光伏接入降低负序原理分析

为简化分析,不考虑机车负载谐波分量,假设平衡变压器次边两个端口电压为

$$\begin{cases} u_\alpha(t) = \sqrt{2}U\sin \omega t \\ u_\beta(t) = \sqrt{2}U\sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

对应的供电臂负载电流分别为

$$\begin{cases} i_1(t) = \sqrt{2}I_1\sin(\omega t - \varphi_1) \\ i_2(t) = \sqrt{2}I_2\sin(\omega t - 90^\circ - \varphi_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中, U, I_1, I_2 分别为端口电压和端口电流有效值。

由文献[16]相关理论可知,负载 2 个端口电流共同作用时的原边三相电流表达式为

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{p=1}^2 KI_p e^{-j\psi_p} \\ \sum_{p=1}^2 I_p e^{-j\psi_p} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(4)中: K 为变压器次边端口电压有效值 U 与一次侧线电压 $\sqrt{3}U_A$ 之比; I_p 为负载端口电流有效值; p 为端口号, $p=1, 2$; ψ_p 为初相角(端口 p 的接线角)。

再利用对称分量法可分解出正、负序电流,可得正序电流和负序电流通用表达式分别为

$$\begin{aligned} i^+ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^2 KI_p e^{-j\varphi_p} \\ i^- &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^2 KI_p e^{-j(\varphi_p + \varphi_p)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, φ_p 为功率因数角。

未接入光伏时,牵引系统两供电臂电压和电流构成的正序和负序见图 2 所示。

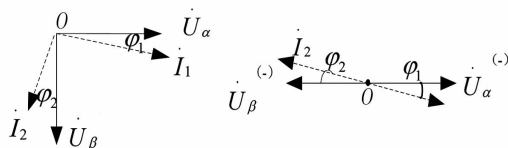


图 2 正序和负序

负序合成电流大小为

$$I^- = K \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1 - I_2 \cos \varphi_2)^2 + (I_1 \sin \varphi_2 - I_2 \sin \varphi_2)^2} = K \sqrt{I_1^2 + I_2^2 - 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (5)$$

式(5)说明,负序合成电流不仅与两供电臂电流大小有关,还和功率因数角差值有关。两供电臂电流有功成分在坐标图上共线反方向,起到相互抵消作用。

接入光伏电能后,仅以光伏馈入有功电流为例,负序合成电流为

$$I^- = K \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1 - I_2 \cos \varphi_2 - I_{c1} + I_{c2})^2 + (I_1 \sin \varphi_1 - I_2 \sin \varphi_2)^2} \quad (6)$$

从式(6)可以看出光伏系统接入改变了原有系统负荷有功分配,灵活调节输出电流 I_{c1} 和 I_{c2} 的分配,将有利于降低系统负序合成电流的大小。

通常采用交直交变换的电力机车功率因数较高,忽略其无功,仅探讨有功影响,则式(5)简化为

$$I^- = K |I_1 - I_2| \quad (7)$$

说明此时负序电流与两供电臂电流差额有关,当两供电臂负荷电流相等时,负序电流为0。

下面以高铁负荷为例,不计无功影响,仅以有功来简要分析 I_{c1} 和 I_{c2} 的分配对系统负序电流的影响。

假设光伏接入的等效额定电流为 $I = I_{c1} + I_{c2}$, 当 $I \leq |I_1 - I_2|$ 时,光伏容量补偿负序不足,光伏电流完全馈入重载供电臂来减小负序,如图3所示(以 $I_2 > I_1$ 为例),此时 $I^- = K_p |I_1 - I_2 - I|$ 。相反,如果此时光伏馈入电流完全到轻载臂,将会加大负序电流,则 $I^- = K |I_1 - I_2 + I|$ 。

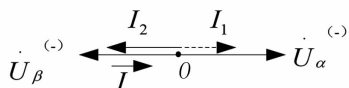


图3 光伏接入负序

当 $I > |I_1 - I_2|$ 时,说明光伏容量足够补偿负序,此时光伏电流同时馈入两供电臂,既要补偿电流差额,使得牵引负荷功率均衡,还要平衡多余的电流,使得合成负序为0,如图4所示,此时两组变流器馈入电流为

$$\begin{cases} I_{c1} = \frac{I - |I_1 - I_2|}{2} \\ I_{c2} = \frac{I + |I_1 - I_2|}{2} \end{cases} \quad (8)$$

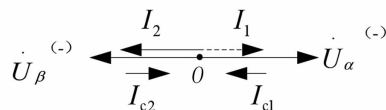


图4 负序

如果两供电臂均处于空载情况下,则两变流器输出电流大小相等,相位相差 90° ,合成负序也为0,如图5所示,此时 $I_{c1} = I_{c2} = \frac{I}{2}$ 。

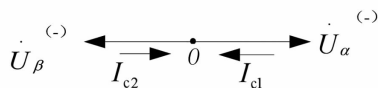


图5 仅光伏接入负序

由上述分析可知,无论是轻载、带载情况下,通过合理分配馈入的供电臂,光伏接入后牵引系统合成负序电流要么为0,要么会得到明显减小。

3 电流检测与控制

光伏接入系统变流器电流检测与控制见图6所示。首先,对两供电臂负载电流有功分量进行检测,得到有效值 I_1 和 I_2 , 电流差值即为不平衡电流。不平衡电流与光伏电池输出电流指令 I 相比较进行判断,判断逻辑见负序分析原理,从而计算出两变流器电流分配指令 I_{c1} 和 I_{c2} 。指令电流分别乘以对应的端口同步信号,即可得到变流器端口电流的瞬时值,该瞬时值经过闭环控制得到变流器调制信号。

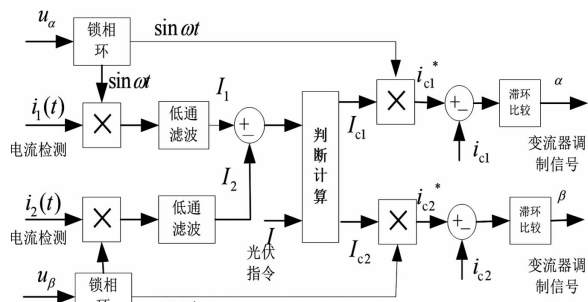


图6 电流检测及控制框

从而变流器端口的输出电流指令为

$$\begin{bmatrix} i_{c1}(t) \\ i_{c2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{c1} \sin \omega t \\ I_{c2} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (9)$$

4 仿真分析

为验证所提方法的有效性,在 Matlab/Simulink

平台上建立了相应的仿真模型,参数见表 1 所示。其中变流器采用电流闭环控制、滞环调制方式。

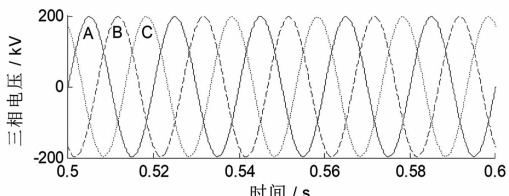
为直观看出补偿效果,负载分空载和带载 2 种情况分别展开仿真。

表 1 仿真参数

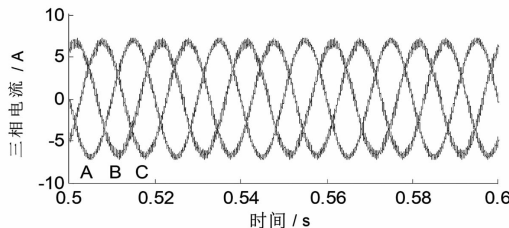
参数	值
三相系统电压/kV	220
平衡变压器变比	220:27.5
升压变压器变比	0.93:27.5
光伏容量/MW	2
直流电压/kV	22

1) 仿真情况 1:两供电臂空载

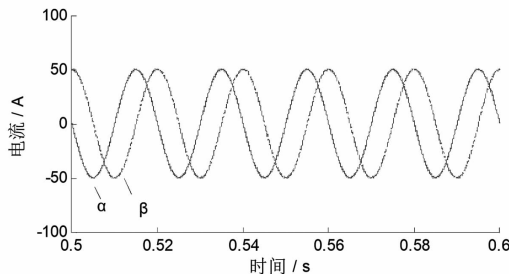
当两供电臂处于空载的情况下,光伏系统仍然需要向系统并网馈入电能,由负序分析可知,两变流器输出电流大小相同,在三相系统中电流对称,仿真结果如图 7 所示。



(a) 三相电压波形



(b) 光伏接入后三相电流波形

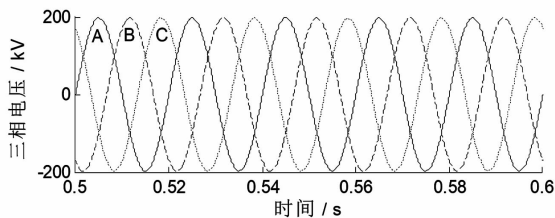


(c) 变流器端口处电流波形
图 7 空载条件下仿真波形

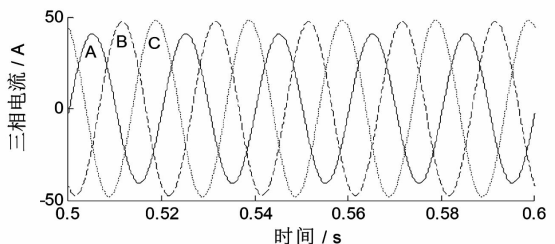
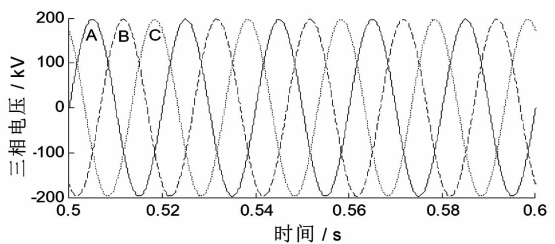
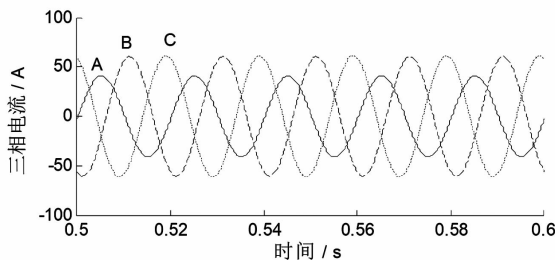
从图 7 可以看出,在供电臂处于空载的情况下,光伏并网电流三相电流对称,负序分量接近为 0,说明采用所提方法接入光伏不会引入新的负序分量,和理论分析相符合。

2) 仿真情况 2:两供电臂带载

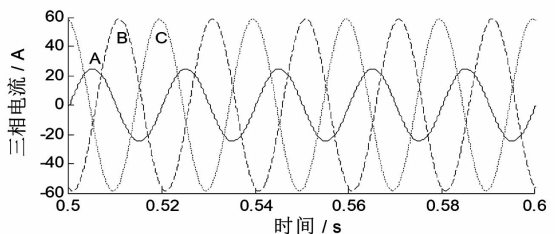
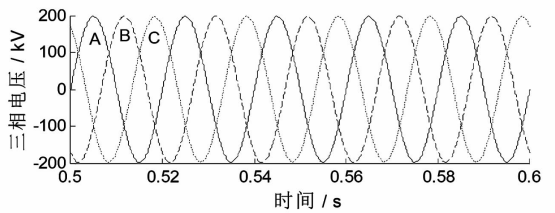
假设 α 、 β 两相供电臂分别所带机车负载为 5 MW 和 8 MW,此时光伏系统电能 2 MW 需要完全馈入 α 相(重载臂)以改善不平衡电流,仿真结果如图 8 所示。



(a) 光伏接入前三相电压和电流波形



(b) 光伏接入后三相侧电压和电流波形(接入重载臂)



(c) 光伏接入后三相侧电压和电流波形(接入轻载臂)

图 8 带载条件下仿真波形

从图 8 可以看出,光伏接入前三相电流不对称,合成负序功率为 3 MW,不平衡度为 23.07%。采用光伏接入重载臂后,合成负序功率为 1 MW,三相电流不平衡度降低为 9.09%。假设三相系统短路容

量为 2000 MVA, 此时对应的三相不平衡电压近似为 0.05%。如果光伏电能接入轻载臂, 合成负序功率为 5 MW, 则三相电流不平衡度为 45.5%, 此时对应的三相不平衡电压近似为 0.25%。显然采用光伏接入需要根据负荷情况合理分配并网供电臂, 才能有效降低负序电流。

从以上两种情况仿真可知, 仿真结果符合理论分析。说明采用所提方法在充分利用新能源的前提下, 同时有助于改善牵引供电系统负序电流问题。

5 结 语

上面提出了一种考虑光伏接入的牵引供电系统负序改善方法, 得出如下结论:

1) 针对牵引供电系统结构的特殊性, 根据负荷电流差值情况, 灵活选择光伏电能接入的供电臂, 能够有效改善牵引供电系统负序电流问题;

2) 该方法可以拓展到光伏加储能接入、风力发电接入等其他类型的新能源接入方式;

3) 该方法同样可以拓展适用于三相 - 两相非平衡变压器结构牵引变压器 (如 YN/d11 和 VX 牵引变压器)。

参考文献

- [1] 于坤山, 周胜军, 王同勋, 等. 电气化铁路供电与电能质量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559 - 568.
- [3] 夏焰坤, 李群湛, 解绍锋. 电气化铁道贯通同相供电变电所控制策略研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(8): 25 - 31.
- [4] 王辉, 李群湛, 解绍锋, 等. 采用 YNd - SVG 的电气化铁路负序补偿模型及控制策略[J/OL]. 高电压技术, 2021, 57(5): 1 - 12.
- [5] 张宇, 王辉, 李群湛, 等. 基于 Dd 匹配变和 SVG 的牵引变电所群贯通供电系统负序治理方案及控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 150 - 158.

- [6] 吴萍, 李群湛. 基于 YN - vd 接线变压器的新型同相牵引供电系统方案[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 87 - 92.
- [7] Zeliang Shu, Shaofeng Xie, Qunzhan Li. Development and Implementation of A Prototype for Co - phase Traction Power Supply System[C]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010: 1 - 4.
- [8] Xiaoqiong He, Zeliang Shu, Xu Peng, et al. Advanced Co - phase Traction Power Supply System Based on Three - phase to Single - phase Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5323 - 5333.
- [9] An Luo, Chuanping Wu, John Shen, et al. Railway Static Power Conditioners for High - speed Train Traction Power Supply Systems Using Three - phase V/V transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 2844 - 2856.
- [10] Kengwen Lao, Ningyi Dai, Weigang Liu, et al. Hybrid Power Quality Compensator with Minimum DC Operation Voltage Design for High Speed Traction Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 2024 - 2036.
- [11] 施大发, 吴传平. 基于两相三线制变流器的高速铁路负序和谐波综合补偿新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 257 - 264.
- [12] 寇磊, 罗安, 吴传平. 基于两相三线制变流器的新型高铁电能质量补偿装置[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 224 - 229.
- [13] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26 - 32.
- [14] 李群湛. 电气化铁道电能质量及其综合控制技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [15] 解绍锋, 方曼琪, 戴朝华. 光伏接入牵引供电系统对电能质量的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 53 - 59.
- [16] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.

作者简介:

夏焰坤(1984), 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析和电能质量分析与控制技术。(收稿日期: 2020 - 03 - 25)

(上接第 61 页)

- [2] 刘振亚, 张启平, 王雅婷, 等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015 - 1022.
- [3] 李春华, 黄伟雄, 袁志昌, 等. 南方电网 ± 200 Mvar 链式 STATCOM 系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 116 - 121.

- [4] 陆继志. STATCOM 在变电站的应用及意义[J]. 云南电业, 2011(8): 37 - 38.

作者简介:

邵沈会(1990), 男, 工程师, 主要从事电力系统稳定分析、电力系统规划研究。

(收稿日期: 2021 - 05 - 15)