

[光伏]

光伏引入牵引供电系统拓扑结构及多影响因素分析

文/刘若飞
中铁第一勘察设计院集团有限公司

光伏引入牵引供电系统有助于电气化铁路绿色用能和节能减排，但传统牵引供电系统三相-两相的不对称结构，叠加单相牵引负荷与光伏发电出力的双重波动性与间歇性，给光伏引入牵引供电系统带来了挑战。探究光伏引入牵引供电系统的不同拓扑结构及其适应性，分析光伏引入牵引供电系统对负序、无功等电能质量的影响，并结合仿真模型与实测数据进行分析验证。

电气化铁路的“大规模、高速度、高密度”发展带来持续增长的供电需求，特别地在西部艰险山区及电网薄弱地区，电气化铁路牵引负荷重、外部电网相对薄弱，导致个别长大坡道区段牵引变电所供电能力保持及电能质量问题存在挑战；与此同时，“双碳”目标的实施，迫切需要电气化铁路用能朝着更加高效能、低碳化和绿色化发展^[1-3]。在西部地区，电气化铁路与风、光新能源网在地理空间上存在紧密交集，充分利用牵引供电系统就近消纳沿线新能源、提高新能源供电渗透率，有利于促进新能源消纳水平和铁路绿色低碳用能。但新能源发电具有不稳定性 and 随机性，电气化铁路也具有大功率、间歇性。因此，牵引供电系统三相-两相拓扑结构的不对称性叠加单相牵引负荷与新能源发电出力的双重波动性与间歇性，给新能源引入电气化铁路带来了较大的难度^[4-5]。

目前，光伏在电气化铁路应用集中于非牵引领

域，能源消耗巨大的牵引供电系统应用还未受到足够关注。基于此，针对电气化铁路不同的牵引供电系统结构，探究光伏发电系统不同接引方案及适应性分析，并重点围绕应用更为广泛的异相背靠背引入方案开展多影响因素分析，以期为后续更加深入研究和应用推广提供参考。

光伏引入牵引供电系统拓扑结构

1. 牵引供电系统拓扑结构

我国电气化铁路牵引供电系统由牵引变电所和牵引网组成，采用单相交流27.5 kV的牵引供电方式。牵引变电所将电力系统三相电变换为适于电力机车牵引的电能，然后输送到铁路沿线架设的接触网上，为电力机车供电，如图1a所示。牵引负荷具有大功率、波动频繁、不平衡的特点，如图1b所示为某客货共线铁路牵引变电所实测负荷曲线。

基金项目： 新能源引入电气化铁路能量管理与控制关键技术及应用（2024SF-YBXM-601）；轨道交通“网—源—储—车”协同供能技术(2021YFB2601500)

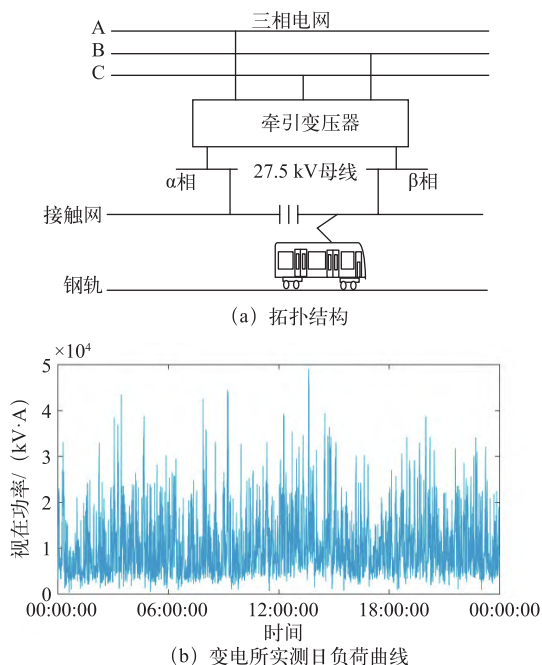


图1 牵引供电系统拓扑结构及变电所实测负荷曲线

2. 光伏发电系统拓扑结构

光伏发电系统主要包括光伏阵列、三相逆变器、LC滤波器、升压变压器及能量管控单元等。光伏阵列产生电能经三相逆变器升压、逆变和滤波器处理后变为符合要求的交流电，最后通过升压变压器并入电网，如图2所示。

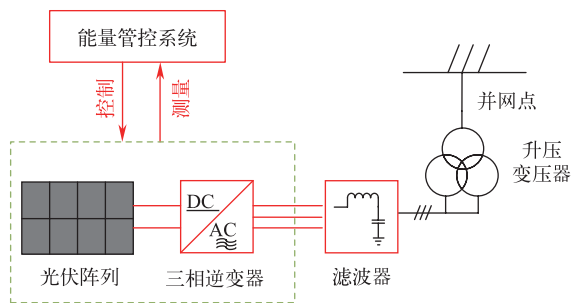


图2 光伏发电系统拓扑结构

光伏引入牵引供电系统拓扑结构及其适应性分析

基于电气化铁路不同的牵引供电系统结构，从牵引变电所引入光伏以及多供电臂消纳光伏出发，文中将光伏引入牵引供电系统方案分为异相引入和同相引入两大类。

1. 异相引入方案

光伏引入异相牵引供电系统一般可分为异相三

相引入和异相背靠背引入方案两种，如图3所示。

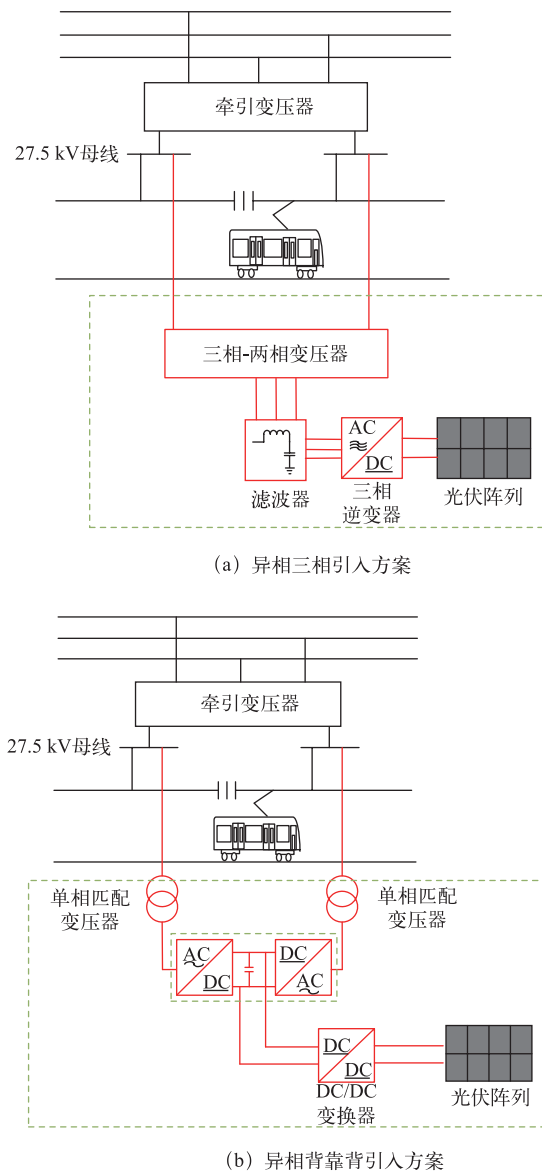


图3 光伏异相引入牵引供电系统拓扑

图3a所示为异相三相引入方案，光伏阵列产生电能经三相逆变器升压、逆变和滤波器处理后变为符合要求的三相交流电，再通过光伏侧三相-两相变压器升压、变换，分别跨接于牵引变电所两段27.5 kV母线上，实现光伏电能为列车供电。

图3b所示为异相背靠背引入方案，光伏阵列产生电能经DC/DC变换器实现升压及最大功率点跟踪，接入交-直-交背靠背变流器的公用直流环节，再利用构成背靠背变流器的两台单相四象限变流器逆变和滤波处理后，经单相匹配变压器升压分别跨接于牵引变电所两段27.5 kV母线上，实现光伏电能

为列车供电。

综上所述,两种方案均可实现光伏电能为列车供电。其中,异相三相引入方案中三相逆变器向两段母线是平均输送电能,无法根据各供电臂负荷大小动态调节光伏出力,易造成一侧供电臂空载或轻载情况下光伏电能倒送的现象;异相背靠背方案中两台单相逆变器独立控制,可根据各供电臂负荷大小动态调节光伏出力,同时实现两供电臂间的功率传输,更易达到供能系统的能量优化协调管控。

2. 同相引入方案

结合目前同相牵引供电新技术,光伏引入同相牵引供电系统一般可分为半功率同相供电引入和全功率同相供电引入方案两种,如图4所示。

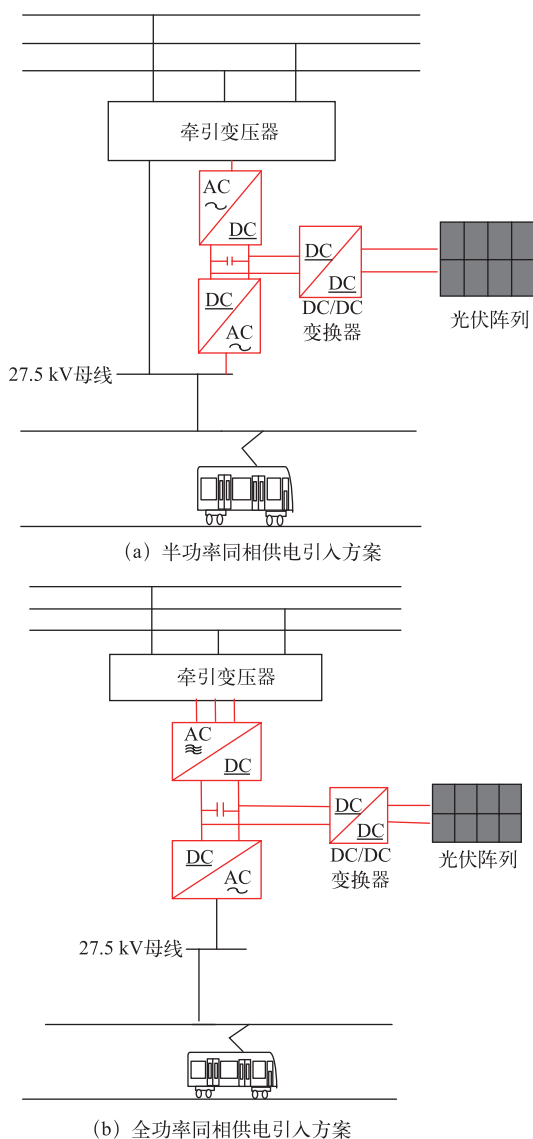


图4 新能源引入同相牵引供电系统形式

综上所述,两种方案均是利用同相供电技术中交流(单相/三相)-直流-交流(单相)变换器结构中的公用直流环节作为新能源引入的接口,并共用了牵引侧的单相变换器变流和单相匹配变压器升压,接入27.5 kV母线实现光伏电能为列车供电。

两种方案充分利用同相牵引供电系统自身设备,达到了减少占地和节省投资的目的。但由于同相牵引供电系统更适用于一些复杂艰险山区长大坡道、外部电源薄弱等牵引供电能力薄弱的特殊场合,且相对传统牵引供电系统投资较高,目前仅应用于一些工程示范项目。

光伏引入牵引供电系统后多影响因素分析

考虑到我国电气化铁路主要采用三相-两相的异相供电方式,下面以异相供电方式下动态性能更优的背靠背引入方案为基础开展多影响因素分析。

1. 负序

以目前应用广泛的V型牵引变压器为例,基于端口变换理论,牵引变压器高、低压侧电流关系有

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ -(I_\alpha + I_\beta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, K 为牵引变压器的电压比。

以A相为基准,根据对称分量法,未引入光伏新能源前,电力系统侧负序电流为

$$I^{(-)} = \frac{1}{3K} [(1-\alpha)I_\alpha + (\alpha^2-1)I_\beta] \quad (2)$$

式中, α 为单位向量算子。

光伏新能源引入后,电力系统侧负序电流变为

$$I^{(-)} = \frac{1}{3K} [(1-\alpha)(I_\alpha + I_{\alpha c}) + (\alpha^2-1)(I_\beta + I_{\beta c})] \quad (3)$$

根据式(3)可知,由于异相背靠背引入方案可实现两供电臂光伏电能的动态调节输出,起到平衡两臂负荷的作用,进而有效降低电力系统侧负序电流。

2. 无功

以目前广泛应用的V型牵引变压器为例,未引入光伏新能源前电力系统侧的功率因数为

$$PF = \frac{E_{\alpha p} + E_{\beta p}}{\sqrt{(E_{\alpha p} + E_{\beta p})^2 + (E_{\alpha q} + E_{\beta q})^2}} \quad (4)$$

式中, $E_{\alpha p}$ 、 $E_{\beta p}$ 分别为 α 、 β 相牵引负荷月有功电

量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $E_{\alpha q}$ 、 $E_{\beta q}$ 分别为 α 、 β 相牵引负荷月无功电量, $\text{kvar}\cdot\text{h}$ 。

光伏新能源引入后电力系统侧的功率因数为

$$PF' = \frac{E_{\alpha p} + E_{\beta p} - E_{PV}}{\sqrt{(E_{\alpha p} + E_{\beta p} - E_{PV})^2 + (E_{\alpha q} + E_{\beta q})^2}} \quad (5)$$

式中, E_{PV} 为光伏发电系统输出的月有功电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

根据式(5)可知, 由于光伏发电系统仅输出有功功率, 对电力系统而言其提供的有功功率减少、无功功率不变, 可见将导致月平均功率因数一定程度地下降。

3. 谐波

电气化铁路目前大多采用交直交型电力机车, 其谐波含量已较交直型电力机车含量大幅降低。而光伏逆变器经良好的控制、滤波装置的处理等措施可以有效减少谐波含量, 即光伏发电系统引入后, 牵引供电系统的谐波问题仍旧主要由电力机车引起。

4. 对牵引网电压稳定性的影响

当列车牵引时, 牵引网电压随牵引负荷的增大而降低, 光伏引入能够分担牵引负荷所需电流, 相应减小电力系统和牵引变压器的压降, 补偿抬升牵引网电压, 其补偿程度与光伏装机容量及发电功率正相关。当列车再生制动时, 牵引网电压将抬升, 如此时光伏电能同时返送电网, 将加剧电压抬升, 因此, 可通过设置大容量储能以达到提升再生制动能量利用和平滑光伏出力的目的。

5. 光伏电能消纳问题

光伏出力受外部气象条件影响明显, 同样具有间歇性、随机波动性, 其动态输出特性可由下式估算

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{S_{ref} \left[1 + k(T_{STC} - T_{ref}) \right]}{S_{STC}} \quad (6)$$

式中, P_{PV} 为光伏发电系统实时输出功率, W ; P_{STC} 为标准测试条件(标准测试条件温度 $T_{STC}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 标准测试条件辐照度 $S_{STC}=1\text{ kW}/\text{m}^2$)下的最大功率, 即光伏装机容量, W ; S_{ref} 为太阳能所接收的总辐照度, $1\text{ kW}/\text{m}^2$; T_{ref} 为太阳电池表面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$T_{ref} = T_{air} + S_{ref} e^{-3.473+0.0594FF} \quad (7)$$

式中, FF 为光伏发电系统附近的风速, m/s ; T_{air} 为

空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

因此, 光伏出力及牵引负荷的不确定性, 将导致光伏发电系统在某些时刻, 如供电臂空载或轻载工况下, 出现输出过剩、电能无法完全消纳的现象, 因此, 同样可通过设置大容量储能和反馈配电系统等措施, 以达到平滑新能源出力和增加光伏消纳能力等目的。

仿真及实例分析

1. 仿真分析

以异相背靠背引入方案为例, 搭建系统仿真模型, 系统主要参数见表1。

表1 系统主要参数

设备	参数名称	参数取值
公用电网	电压等级/ kV	110
	短路容量/ MW	750
V/v牵引变压器	容量/ $(\text{MV}\cdot\text{A})$	20+20
光伏发电单元	装机容量/ MWp	5
单相匹配变压器	容量/ $(\text{MV}\cdot\text{A})$	5
	变比	27.5/1
单相变流器	容量/ $\text{MV}\cdot\text{A}$	5
	直流侧电压/ V	1 500

电力机车以功率因数为0.99的负载作为列车建模, 光伏发电系统工作条件采用标准测试条件(温度 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、辐照度 $S=1\text{ kW}/\text{m}^2$), 此时光伏实时输出功率 $P_{PV}=5\text{ MW}$ 。整个仿真过程选取四种典型工况, 每种工况持续时间为10 s, 具体为: 0~10 s, 两侧供电臂均无列车工作; 10~20 s, α 相出现列车(牵引功率20 $\text{MV}\cdot\text{A}$); 20~30 s, β 相出现列车(牵引功率10 $\text{MV}\cdot\text{A}$); 30~40 s, 光伏投入工作(输出功率为5 MW)。牵引供电系统负序电流、牵引变压器出口电压, 如图5、图6所示。

由图可知, 0~10 s, 两侧供电臂均无列车工作, 此时网侧负序电流为0 A, 且牵引网电压维持在27.5 kV; 10~20 s, α 相列车投入工作, 牵引功率为20 MW , 此时网侧负序电流达到194 A, 且 α 相出口电压发生较大跌落, α 相出口电压变化较小; 20~30s, β 相列车投入工作, 牵引功率为10 MW , 由于变压器的负序补偿特性, 网侧负序电流有所降低, 但变压器出口电压进一步降低; 30~40 s, 光伏投入 α 相工作, 输出功率为5 MW , 进一步降低了网侧的负序电流, 同时 α 相出口电压也得到抬升。

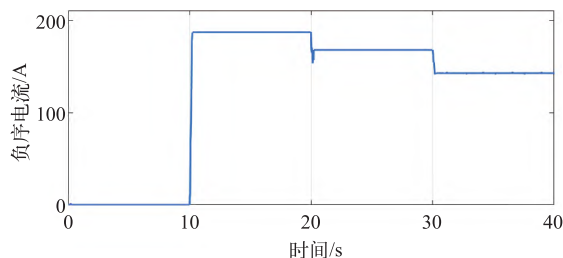


图5 系统负序电流

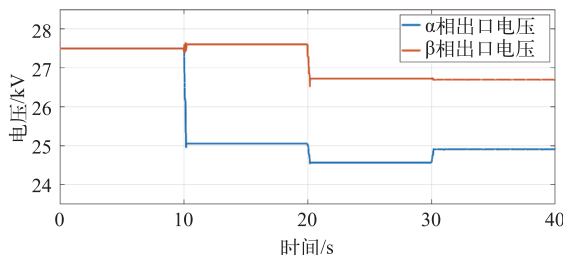


图6 牵引变压器出口电压

2. 实例分析

鉴于光伏出力 and 牵引负荷同时具有不确定性，为进一步考察光伏引入后全系统负序特性，考虑列车运行的日周期性，牵引侧选取牵引变电所典型日负荷实测数据，光伏侧选取某地夏季日气象数据，对光伏引入前、后系统负序进行分析，光伏电能采取实发实用、余电经变电所上网的原则。

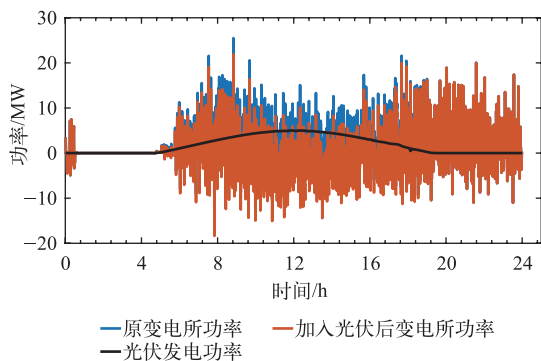


图7 光伏加入前后系统功率和光伏功率图

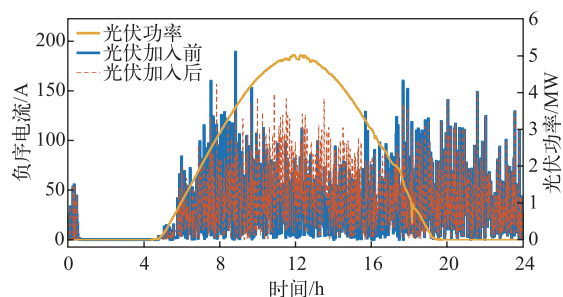


图8 光伏加入前后系统负序和光伏功率图

由图8可知，光伏加入前系统负序电流最大值为190 A，光伏加入后系统负序电流最大值为156 A，降低了37%。考虑到光伏大功率出力和列车再生制动同时发生导致的负序电流上升，采用储能系统可以进一步降低系统负序电流，并提高新能源在牵引供电系统中的消纳，后续将进一步深化研究。

结束语

综上所述，文中系统性探究光伏发电系统牵引侧不同接引方案及其适应性，且针对性分析异相背靠背引入方案下的多影响因素，主要结论如下。

- 1) 光伏引入牵引供电系统改善了铁路单一供能结构，增加了系统功率调节手段，有利于铁路用能朝着高效化、绿色化和低碳化发展。
- 2) 光伏异相背靠背引入牵引供电系统可以平衡两供电臂负荷，对系统负序和牵引网电压均有一定的补偿作用。
- 3) 光伏引入牵引供电系统将在一定程度上降低月平均功率因数和拓宽谐波频谱。
- 4) 由于目前尚无相关政策支持光伏发电系统通过牵引变电所向电力系统反送电能，对于大容量光伏电站的电能消纳问题，可以通过设置大容量储能、反馈配电系统等措施，以达到平滑新能源出力、增加可调度性等目的。EA

(收稿日期：2025-07-04)

参考文献

- [1] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 119-124.
- [2] 李红梅, 戚广枫, 方华松, 等. 大功率变流BPT系统在长大坡道电分相的创新应用[J]. 中国铁路, 2019(1): 60-66.
- [3] 吕顺凯. 重载铁路再生制动能量利用方案研究与应用[J]. 中国铁路, 2022(11): 45-54.
- [4] 戴朝华, 陈维荣, 等. 电气化铁路牵引供电系统光伏发电理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020. [1].
- [5] 王永泽, 曹宇静, 李凌志. 基于光伏发电系统的新能源微电网技术在铁路站段的应用研究[J]. 铁道运输与济, 2024, 46(10): 18-24, 111.