

# 光伏接入牵引供电系统对电能质量的影响

解绍锋,方曼琪,夏国华,戴朝华

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:**提出将光伏系统作为牵引负荷电源之一,与电力系统共同给牵引负荷供电的方案。光伏系统在 27.5 kV 侧接入牵引供电系统,分析牵引负荷特性和光伏系统输出特性,推导计算光伏系统接入前、后对电力系统侧电能质量的影响;针对不同工况对光伏接入后电能质量的影响进行仿真分析,基于实测负荷数据对光伏系统接入前、后电能质量的影响进行验证。结果表明:所研究的光伏接入方案对电力系统侧三相电压不平衡度不产生影响,对三相谐波畸变率以及功率因数的影响与接入光伏系统的大小有关。

**关键词:**牵引供电系统;电力系统;光伏发电系统;电能质量

**中图分类号:**U 224.8;TM 615

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.009

## 0 引言

随着社会的不断发展进步,环境污染和能源匮乏问题也随之凸显,新能源的开发利用已经成为可持续发展中十分重要的一个环节。太阳能作为丰富的可再生能源使得光伏发电成为我国在新能源方面的重要发展方向<sup>[1]</sup>。光伏发电是一种绿色能源,具有无污染、无噪声、易获取等优点,随着技术的进步,其应用领域在不断扩大<sup>[2]</sup>。目前,我国高速铁路发展迅猛<sup>[3]</sup>,是电力系统的能耗大户,铁路网中 60% 以上的耗电量和污染物排放由铁路牵引供电系统造成<sup>[4]</sup>,为了进一步落实国家节能环保政策,我国铁路部门高度重视新能源的应用技术科研投入,制订了多项具有针对性的政策措施<sup>[5]</sup>。开展铁路领域的节能减排和可再生能源利用工作具有广阔的前景和良好的经济性、社会价值。

将光伏系统接入牵引供电系统向牵引负荷供电,可在一定程度上降低电气化铁路对电力系统的供电需求,有利于充分利用电力系统的供电资源。若在接入光伏系统的基础上增加储能装置,可提高光伏能量的利用率,降低牵引负荷剧烈波动对电力系统的影响,减少牵引负荷产生的负序,改善电能质量指标,因此其在实现电气化铁路的节能和环保方面具有重大意义。

目前,将光伏系统接入牵引供电系统的相关研究较少,文献[6]介绍了德国铁路系统将光伏发电直接接入牵引供电系统的技术,即将光伏组件于铁路沿线布置,这种方法的不足是光伏组件性能容易受到列车运行状态的影响。为此本文提出了将光伏组件集中布置,在铁路沿线以光伏电站的形式接入牵引供电系统的方案。

本文重点研究光伏系统接入后对电力系统电能质量指标的影响,通过对光伏系统接入牵引供电系统的方案进行理论分析和建模,搭建仿真模型进行验证,以 2 MV·A 的光伏系统在牵引变电所的 27.5 kV 侧接入为例进行仿真分析,研究光伏系统接入前、后对电力系统侧电能质量的影响,进一步论证该方案的可行性。

## 1 接入方案

光伏发电系统是利用太阳能光伏板进行发电,通过升压和逆变 2 级转换后变为交流量<sup>[7-8]</sup>。其可作为电源接入牵引变电所的 110 kV 侧或 27.5 kV 侧,与电网同时向牵引供电系统供电。若利用牵引变电站的 110 kV 进线侧作为光伏并网接入点,则与常规光伏并网无异,但利用铁路用地的光伏发电系统容量较小,在经济性方面无突出优势,即使光伏发电系统以额定输出且无牵引负荷,当光伏发电系统的输出功率全部进入电力系统时,在 110 kV 侧的电流仍然很小,110 kV 侧电流互感器设备的计量精度难以满足要求。若在牵引变电站的 27.5 kV 侧接入光伏发电系统,因为电压等级低,能够直接为牵引负荷供电。因此,本文着重分析光伏系统在 27.5 kV 侧接入牵引供电系统的方案。

光伏系统产生 27.5 kV 的三相交流电,在牵引变电站的 27.5 kV 公共母线处接入系统后,分别接入 1 号牵引变压器和 2 号牵引变压器,正常发电时,通过主用牵引变压器接入系统,接入方案示意图如图 1 所示。

在接入点前设置计量点,用于计算光伏发电量。利用牵引变电站的 27.5 kV 公共母线作为光伏并网接入点,可以实现同时向两侧母线供电。但是,需论证接入光伏发电系统后对电能质量的影响,特别是不同牵引负荷下电压不平衡度是否满足相关标准要求,确保可以顺利接入电网。

收稿日期:2017-08-04;修回日期:2018-07-01

基金项目:铁路系统光伏供电项目(2016H01842)

Project supported by the Photovoltaic Power Supply Project of Railway System(2016H01842)

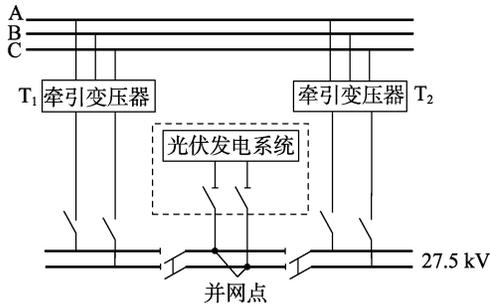


图 1 27.5 kV 侧接入光伏发电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of PV generation system accessing at 27.5 kV side

## 2 理论分析

### 2.1 光伏牵引特性

我国的电气化铁路牵引供电系统采用工频单相交流制,牵引负荷是一种单相交流非线性负荷<sup>[9]</sup>。牵引供电系统大量采用 V 型接线牵引变压器,这种接线方式简单、容量利用率高。本文以光伏系统采用 V 型接线变压器为例分析光伏牵引特性。方案示意图如图 2 所示。

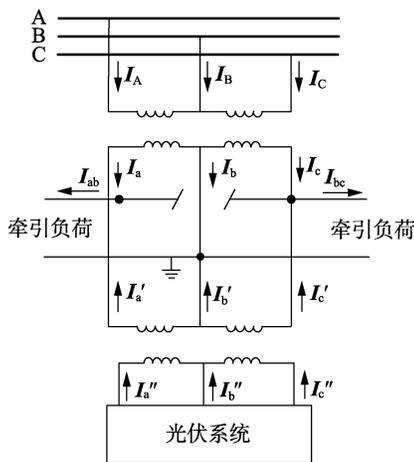


图 2 光伏系统采用 V 型变压器接入牵引供电系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of PV generation system accessing to traction power supply system through V-type transformer

设光伏系统升压变压器和牵引变压器的变比分别为  $k_1$  和  $k_2$ 。

光伏系统升压变压器原次边电流关系为:

$$\begin{cases} I'_a = I'_{ab} = k_1 I''_{ab} = k_1 I''_a \\ I'_c = -I'_{bc} = -k_1 I''_{bc} = k_1 I''_c \\ I'_b = -I'_a - I'_c = k_1 (-I''_a - I''_c) = k_1 I''_b \end{cases} \quad (1)$$

光伏系统输出的三相电流  $I''_a$ 、 $I''_b$ 、 $I''_c$  对称,可得光伏系统注入牵引供电系统的三相电流  $I'_a$ 、 $I'_b$ 、 $I'_c$  对称。

分析式(1)可以得到光伏系统在电力系统侧产生的三相电流分量为:

$$\begin{cases} I_{A1} = \frac{1}{k_2} I_{a1} = -\frac{1}{k_2} I'_a = -\frac{k_1}{k_2} I''_a \\ I_{B1} = \frac{1}{k_2} I_{b1} = -\frac{1}{k_2} I'_b = -\frac{k_1}{k_2} I''_b \\ I_{C1} = \frac{1}{k_2} I_{c1} = -\frac{1}{k_2} I'_c = -\frac{k_1}{k_2} I''_c \end{cases} \quad (2)$$

分析式(2)可得光伏系统产生的三相电流注入电力系统是对称的。

按照规格化定向规则,2 个牵引端口的负荷电流分别为  $I_{ab}$  和  $I_{bc}$ ,牵引变压器副边电流与两牵引端口电流关系为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} I_a = I_{ab} \\ I_b = -I_{ab} + I_{bc} \\ I_c = -I_{bc} \end{cases} \quad (3)$$

牵引负荷在电力系统侧产生的三相电流分量为:

$$\begin{cases} I_{A2} = \frac{1}{k_2} I_{a2} = \frac{1}{k_2} I_{ab} \\ I_{B2} = \frac{1}{k_2} I_{b2} = -\frac{1}{k_2} I_{ab} + \frac{1}{k_2} I_{bc} \\ I_{C2} = \frac{1}{k_2} I_{c2} = -\frac{1}{k_2} I_{bc} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,牵引负荷电流反映到三相电力系统是不对称的。

当牵引负荷功率远大于光伏系统功率,且牵引负荷功率因数和光伏系统功率因数均为 1 时,两者在三相电力系统中产生的电流相量图如图 3 所示。

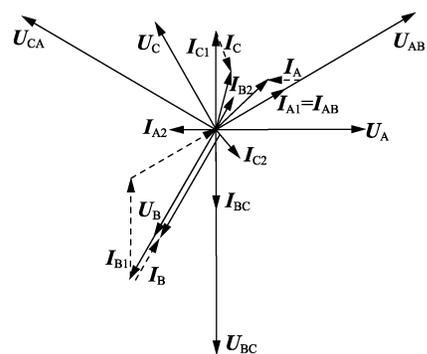


图 3 三相电力系统侧电流相量图

Fig.3 Current phasor of three-phase power system

由以上分析可知,光伏系统采用 Vv 接线方式可将光伏能量注入三相电力系统。

### 2.2 电能质量影响理论分析

将光伏系统看作电力系统负载,分别考虑光伏系统和牵引负荷对电力系统产生的影响,对式(2)和式(4)应用叠加原理可得电力系统侧三相电流为:

$$\begin{cases} I_A = I_{A1} + I_{A2} = -\frac{k_1}{k_2} I''_a + \frac{1}{k_2} I_{ab} \\ I_B = I_{B1} + I_{B2} = -\frac{k_1}{k_2} I''_b + \frac{1}{k_2} (-I_{ab} + I_{bc}) \\ I_C = I_{C1} + I_{C2} = -\frac{k_1}{k_2} I''_c - \frac{1}{k_2} I_{bc} \end{cases} \quad (5)$$

设牵引负荷的视在功率为  $S$ , 光伏系统输出功率为  $kS$ ,  $k=0$  等效于光伏系统未接入, 则有:

$$kU_{\text{qy}}(I_{ab} + I_{bc}) = \sqrt{3}U_{\text{nb}}I''_a \quad (6)$$

其中,  $U_{\text{qy}}$  为牵引供电臂电压;  $U_{\text{nb}}$  为光伏系统输出电压。

根据 2.1 节分析可得:

$$U_{\text{nb}} = k_1 U_{\text{qy}} \quad (7)$$

光伏系统输出的三相电流大小为:

$$I''_a = I''_b = I''_c = \frac{k}{\sqrt{3}k_1} (I_{ab} + I_{bc}) \quad (8)$$

以电力系统侧 A 相电压  $U_A$  的相角为基准值, 电力系统侧三相电流为:

$$\begin{cases} I_A = -\frac{k_1}{k_2} \frac{k}{\sqrt{3}k_1} (I_{ab} + I_{bc}) e^{j(-\phi)} + \frac{1}{k_2} I_{ab} e^{j(\pi/6-\theta_1)} \\ I_B = -\frac{k}{\sqrt{3}k_2} (I_{ab} + I_{bc}) e^{j(-2\pi/3-\phi)} + \\ \frac{1}{k_2} [-I_{ab} e^{j(\pi/6-\theta_1)} + I_{bc} e^{j(-\pi/2-\theta_2)}] \\ I_C = -\frac{k}{\sqrt{3}k_2} (I_{ab} + I_{bc}) e^{j(2\pi/3-\phi)} - \frac{1}{k_2} I_{bc} e^{j(-\pi/2-\theta_2)} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\phi$  为光伏系统的功率因数角;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为两臂牵引负荷的功率因数角。

根据对称分量法可得电力系统侧三相电压不平衡度为:

$$U_{\text{e}} = \frac{\sqrt{3}U_1 I}{S_d} \times 100\% \quad (10)$$

其中,  $U_1$  为电力系统侧线电压;  $I$  为负序电流;  $S_d$  为系统短路容量。

牵引变电所高压侧线电压为 110 kV, 短路容量为 750 MV·A。当两牵引供电臂负荷均为一列满载运行的 CRH3 型动车组时, 两牵引供电臂的电流大小均为 320 A<sup>[10]</sup>, 图 4 为电力系统侧三相电压不平衡度与光伏系统功率和牵引负荷功率比值  $k$  的关系,  $k=0$  时表示没有接入光伏系统。由图 4 可以看出, 光伏系统接入前、后电力系统侧三相电压不平衡度不发生改变, 光伏系统的接入功率大小对其不产生影响。分析式(10)可得, 当负序电流大小及线电压一定时, 电压三相不平衡度只与系统的短路容量有关。

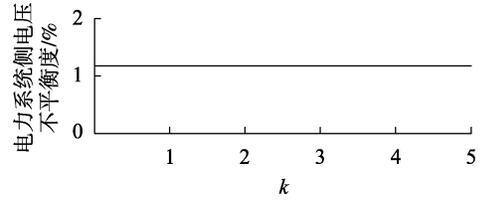


图 4 电力系统侧三相电压不平衡度与  $k$  的关系

Fig.4 Relationship between three-phase voltage unbalance degree of power system and  $k$

设电力系统侧功率因数为  $\cos \psi$ , 则有:

$$\cos \psi = \frac{P}{S} = \frac{U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C}{U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C} \quad (11)$$

设光伏系统的功率因数为 1, 牵引负荷的功率因数为 0.98, 将式(9)中三相电流代入式(11), 可得电力系统侧功率因数与  $k$  的关系如图 5 所示。当光伏系统的容量不断增大时, 电力系统侧三相功率因数逐渐降低。光伏系统接入后降低了牵引变电所全天平均功率因数的根本原因在于: 加入功率因数为 1 的光伏系统后, 牵引供电系统消耗的有功电能减少, 但无功电能大小保持不变。

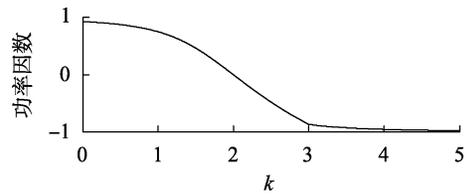


图 5 电力系统侧功率因数与  $k$  的关系

Fig.5 Relationship between power factor of power system and  $k$

光伏系统输出的谐波电压主要由逆变器产生。理想条件下, 逆变器输出线电压的频谱中没有载波角频率  $\omega_z$  整数倍的谐波, 谐波中幅值较高的分量对应的角频率为  $\omega_z \pm 2\omega_r$  和  $2\omega_z \pm \omega_r$ , 其中  $\omega_r$  为调制信号的频率。实际电路中谐波的分布情况更为复杂, 在不考虑背景谐波电压及逆变器控制性能的前提下, 逆变器产生的谐波电流主要包括两部分: 一部分是死区导致的 3、5、7 等低次谐波, 另一部分是与逆变器开关频率密切相关的高次谐波<sup>[11]</sup>。电网的谐波电压与三相不平衡等因素也是光伏逆变器产生不同次数谐波电流的原因<sup>[12-14]</sup>。

### 3 系统仿真分析

#### 3.1 系统建模

光伏系统接入牵引供电系统的结构图如图 6 所示。光伏电站采用太阳能光伏板进行发电, 通过 DC/DC、DC/AC 两级变换将光伏板产生的直流电变换为三相交流电接入 27.5 kV 牵引母线, 为电力机车供电。

DC/DC 变换器将光伏阵列产生的直流电压升

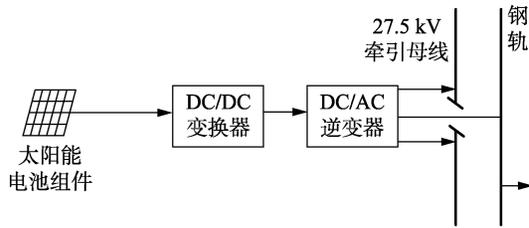


图 6 光伏系统接入牵引供电系统结构图

Fig.6 Structure diagram of PV generation system accessing to traction power supply system

压或者降压为满足并网逆变器要求的直流电压,同时实现对光伏电池阵列的最大功率点跟踪(MPPT)<sup>[15-16]</sup>;DC/AC 逆变器将 DC/DC 变换器产生的直流电通过三相逆变器变换为三相交流电,通过升压变压器在牵引变电站牵引母线处接入系统。

实现 DC/AC 变换的三相逆变器采用双环控制方式<sup>[17-18]</sup>。为了实现最大功率点跟踪,外环采用恒功率控制,得到内环控制电流参考信号;内环采用电流控制,电流内环控制原理如图 7 所示。图中, $i_d$ 和 $i_q$ 分别为逆变器输出电流经过 dq 变换后产生的有功分量和无功分量; $i_{dref}$ 和 $i_{qref}$ 分别为有功和无功电流的参考值; $u_d$ 和 $u_q$ 分别为逆变器输出电压的 d、q 轴分量; $u_{dref}$ 和 $u_{qref}$ 为 dq 坐标下的参考电压。

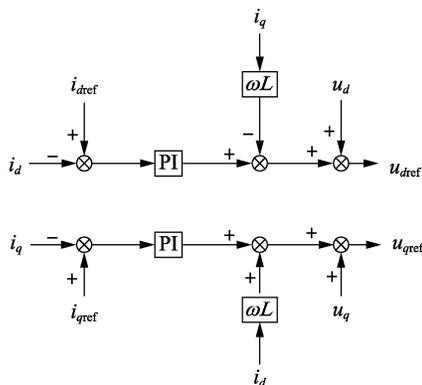


图 7 电流内环控制原理图

Fig.7 Principle of inner-loop current control

电力系统侧额定电压为 110 kV,短路容量为 750 MV·A。牵引变压器采用 V 型接线形式,牵引网电压为 27.5 kV。通过受控电流源模拟实现牵引负荷的无功和谐波特性和。

### 3.2 仿真分析

接入牵引供电系统的光伏系统功率大小设为 2 MV·A,功率因数为 1。在该仿真条件下分析光伏系统接入牵引供电系统后对电力系统产生的影响,包括电力系统侧三相电压不平衡度、电压总谐波畸变率以及功率因数。

#### 3.2.1 运行方式

牵引负荷具有随机波动性,两供电臂的负荷情况是不确定的。选取如下 3 个典型工况分析方案的可行性。

a. 工况 1:两牵引供电臂负荷相等,均为一列满载运行的 CRH3 型动车组,此时负荷电流表达式如下<sup>[8]</sup>。

$$i(t) = 320\sqrt{2}\sin(\omega t - 11.48^\circ) + 6.097\sqrt{2}\sin(3\omega t - 20^\circ) + 0.729\sqrt{2}\sin(5\omega t - 15^\circ) + 0.485\sqrt{2}\sin(11\omega t + 30^\circ) + 1.469\sqrt{2}\sin(13\omega t) + 1.138\sqrt{2}\sin(15\omega t + 15^\circ)$$

b. 工况 2:其中一牵引供电臂没有负荷,另一牵引供电臂负荷为一列满载运行的 CRH3 型动车组。

c. 工况 3:两牵引供电臂均没有牵引负荷,此时系统处于空载的状况,光伏系统能量反馈给电网。

#### 3.2.2 电压谐波畸变率

光伏系统未接入时电力系统侧各相电压谐波含量如图 8 所示,此时电力系统侧谐波主要来自牵引负荷。

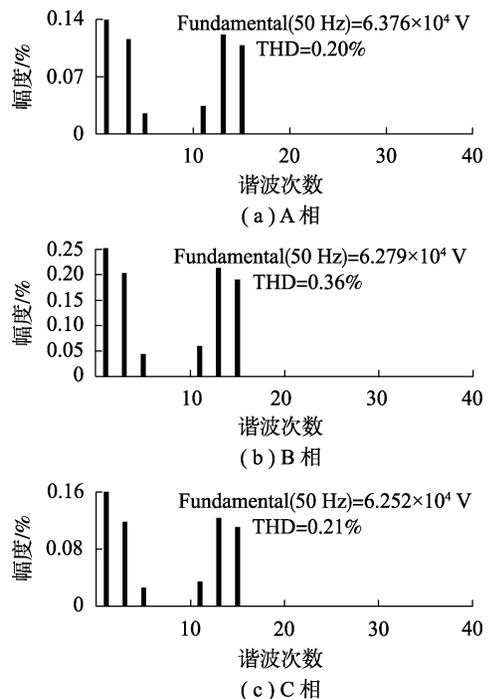


图 8 接入光伏系统前电力系统侧三相电压谐波含量

Fig.8 Three-phase voltage harmonic content of power system before accessing PV generation system

当两供电臂均无牵引负荷时,光伏系统接入后电力系统侧各相电压谐波含量如图 9 所示,此时电力系统侧谐波主要由光伏系统产生,经过牵引变压器反映到电力系统侧。

3 种工况下光伏系统接入前、后电力系统侧三相电压畸变率大小如表 1 所示。

分析表 1 可得到,在 3 种不同工况下,光伏系统接入后电力系统侧三相电压畸变率均有所增加,但是在该仿真条件下光伏系统接入牵引供电系统后电力系统侧的电压总谐波畸变率在国家标准 GB/T 14549—1993《电能质量 公共电网谐波》要求的限制范围内。

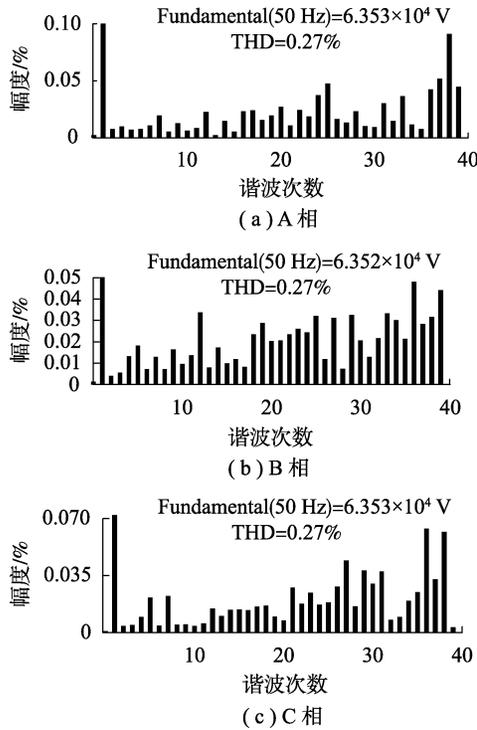


图 9 光伏系统接入后电力系统侧三相电压谐波含量

Fig.9 Three-phase voltage harmonic content of power system after accessing PV generation system

表 1 三相电压畸变率

Table 1 Distortion rate of three-phase voltage

工况	A 相电压畸变率/%		B 相电压畸变率/%		C 相电压畸变率/%	
	接入前	接入后	接入前	接入后	接入前	接入后
	工况 1	0.20	0.34	0.36	0.45	0.21
工况 2	0.20	0.34	0.21	0.33	0	0.26
工况 3	0	0.27	0	0.27	0	0.27

3.2.3 三相电压不平衡度

光伏系统接入前、后电力系统侧三相电压不平衡度大小如表 2 所示。

表 2 三相电压不平衡度

Table 2 Three-phase voltage unbalance degree

光伏系统接入情况	三相电压不平衡度/%		
	工况 1	工况 2	工况 3
未接入	1.2	1.19	0.006
接入	1.2	1.18	0.006

由表 2 可得,光伏系统接入牵引供电系统前、后电力系统侧三相电压不平衡度的大小基本不变;在不同工况下,三相电压不平衡度的大小不相等。该结果与理论分析结果相同。

3.2.4 功率因数

光伏系统接入前、后电力系统三相功率因数大小如表 3 所示。

由表 3 可得,光伏系统的接入使电力系统侧的功率因数降低,当光伏系统的功率大小一定时,牵引

表 3 功率因数

Table 3 Power factor

光伏系统接入情况	功率因数		
	工况 1	工况 2	工况 3
未接入	0.984 7	0.983 2	0.707 1
接入	0.979 2	0.969 4	-0.997 3

负荷的功率越大,其对功率因数的影响程度越小;在工况 3 情况下,光伏系统向电力系统返送功率。

4 实测数据分析

牵引变电所的负荷呈现频繁波动的状态,会对电力系统的电能质量产生影响。基于某牵引变电所一天 24 h 的实测负荷数据,对加入 2 MV·A 光伏系统前、后电力系统侧电能质量的变化情况进行分析。每 3 s 记录一次馈线电流大小,该牵引变电所的两供电臂全天馈线电流如图 10 所示。

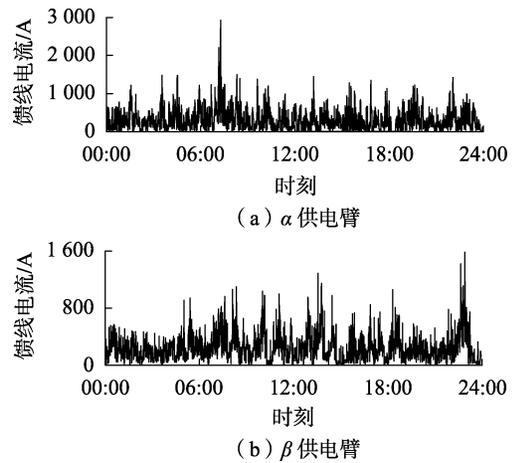


图 10 两供电臂全天馈线电流

Fig.10 Feeder currents of two power supply arms in all day

牵引变电所高压侧线电压为 110 kV,短路容量为 750 MV·A。在 08:00—18:00 之间接入容量为 2 MV·A 的光伏系统,接入前、后电力系统侧三相电压不平衡度变化图如图 11 所示。

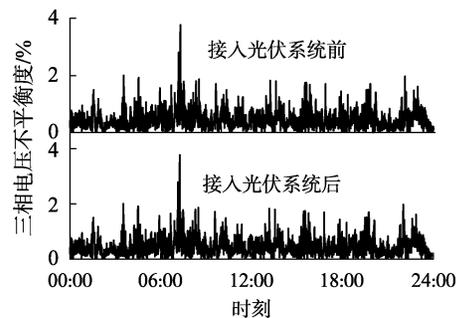


图 11 接入光伏系统前、后三相电压不平衡度

Fig.11 Three-phase voltage unbalance degree before and after accessing PV generation system

光伏系统接入前、后电力系统侧三相电压不平衡度不变,95% 概率大值(指将采样点按从大到小的

顺序排列,去除5%的最大值,剩下采样点中最大的)等于0.98%,与理论分析结果保持一致。

令电力系统输出功率为正,光伏系统返送功率为负。将各记录点的有功功率相加,可得光伏系统接入前电力系统输出总有功电量为251 000 kW·h,总无功电量为23 300 kvar·h;光伏系统接入后电力系统输出总有功电量为230 600 kW·h,总无功电量为23 300 kvar·h。光伏系统接入前、后电力系统输出总无功电量不变,有功电量减少20 400 kW·h,此部分有功电量由光伏系统提供。

返送给电力系统的电量占光伏输出总电量的14.2%,其余电量被牵引负荷消耗。若无功返送不计,接入光伏系统前该牵引变电所全天平均功率因数为0.958,接入光伏系统后该牵引变电所全天平均功率因数为0.953,接入前、后全天平均功率因数基本不变。当接入的光伏系统的容量为4 MV·A、8 MV·A、10 MV·A时,该牵引变电所全天平均功率因数分别为0.948、0.936、0.930。接入光伏系统后平均功率因数发生下降,这与接入的光伏系统容量大小有关,但功率因数均高于0.9。利用光伏逆变器的无功调节特性对系统进行一定的无功补偿,可以使功率因数问题得到一定的缓解。

## 5 结论

本文提出了一种将光伏系统接入牵引供电系统的方案,经过理论推导、仿真验证和实测数据研究分析了光伏系统的接入对电力系统侧电能质量的影响,所得结论如下。

**a.** 由于光伏系统产生的三相电流注入电力系统是对称的,光伏系统接入后不影响电力系统侧的三相电压不平衡度。

**b.** 在有牵引负荷的前提下,接入光伏系统后牵引变电所的平均功率因数可能下降,这与光伏系统的容量大小有关。若光伏系统的容量相较于牵引负荷较小,则光伏系统的接入对电力系统侧的功率因数影响不大。

**c.** 光伏系统的接入会增大三相电压畸变率。光伏系统的谐波特性复杂,需通过改变逆变器的控制策略或安装滤波装置等多种方法降低其流入电网的谐波含量。

## 参考文献:

- [1] 马宁. 太阳能光伏发电概述及发展前景[J]. 智能建筑电气技术, 2011, 5(2): 25-28.  
MA Ning. Overview and development prospects on solar photovoltaic [J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2011, 5(2): 25-28.
- [2] 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, 39.

- CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [3] 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.  
LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559-568.
- [4] 周新军. 国外铁路节能减排发展新趋势[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2016, 43(2): 90-94.  
ZHOU Xinjun. New development trend of energy saving and emissions reduction of the foreign railways [J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2016, 43(2): 90-94.
- [5] 杨全亮. 新能源和可再生能源在铁路应用现状及展望[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2015, 42(3): 106-108.  
YANG Quanliang. The current situation and outlook of new energy and renewable energy applied in railway [J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2015, 42(3): 106-108.
- [6] MAYER O, LYNASS, MGOMEZ M, et al. Design aspects for high voltage MW PV systems for railway power supply [C] // European PV Solar Energy Conference. Amsterdam, Netherlands: European PV Solar Energy Conference, 2014: 2876-2879.
- [7] 赵杰. 光伏发电并网系统的相关技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
ZHAO Jie. Study on related technologies of grid-connected photovoltaic power system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [8] 汪飞, 徐新蔚, 吴春华. 光伏微型逆变器拓扑结构研究与分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 24-33.  
WANG Fei, XU Xinwei, WU Chunhua. Research and analysis of photovoltaic micro-inverter topology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 24-33.
- [9] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007: 6-7.
- [10] 李群湛, 贺建闽, 解绍锋. 电气化铁路电能质量分析与控制[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011: 85-89.
- [11] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16.  
XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16.
- [12] INFIELD D G, ONIONS P, SIMMONS A D, et al. Power quality from multiple grid-connected single-phase inverters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1983-1989.
- [13] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.
- [14] YAZDANI A, IRAVANI R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1620-1629.
- [15] 赵争鸣. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 109-113.
- [16] 陈树勇, 鲍海, 吴春洋, 等. 分布式光伏发电并网功率直接控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 6-11.  
CHEN Shuyong, BAO Hai, WU Chunyang, et al. Direct grid-tie

power control method for distributed photovoltaic generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 6-11.

- [17] 沈欣炜,郑竞宏,朱守真,等. 光伏并网逆变器控制参数的  $dq$  轴解耦辨识策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 38-43.

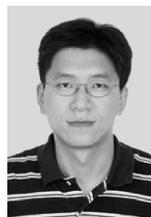
SHEN Xinwei, ZHENG Jinghong, ZHU Shouzhen, et al. A  $dq$  axis decoupling parameter identification strategy for grid-connected inverter controller of photovoltaic generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 38-43.

- [18] 徐少华,李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 25-33.

XU Shaohua, LI Jianlin. Grid-connected/island operation control

strategy for photovoltaic/battery micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 25-33.

#### 作者简介:



解绍锋

解绍锋(1976—),男,河北定州人,教授,博士研究生导师,研究方向为牵引供电系统分析和电能质量(E-mail: sfxie@swjtu.cn);

方曼琪(1995—),女,江西上饶人,硕士研究生,研究方向为电能质量分析。

## Influence of PV generation system accessing to traction power supply system on power quality

XIE Shaofeng, FANG Manqi, XIA Guohua, DAI Chaohua

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A traction load power supply scheme is proposed, in which the PV (PhotoVoltaic) generation system is used as one of the power sources to supply power together with power system. The PV generation system is accessed into the traction power supply system at 27.5 kV side. The characteristics of traction loads and PV output are analyzed, and the influence of the PV generation system access on power quality is derived. The influences of PV generation system on power quality in different working conditions are simulated, which are verified by the practical load data. Simulative results show that the studied PV access scheme has no influence on three-phase voltage unbalance factor of the power system, and the influences on three-phase harmonic distortion rate and power factor is related to the capacity of the accessed PV system.

**Key words:** traction power supply system; electric power systems; photovoltaic generation system; power quality

(上接第 52 页 continued from page 52)

## Multi-objective optimization control of wind power consumption based on regenerative electric boiler system integrated with large-scale energy storage

LI Guoqing<sup>1</sup>, ZHUANG Guanqun<sup>1</sup>, TIAN Chunguang<sup>2</sup>, WANG He<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China)

**Abstract:** There are problems that the contradiction between source supply and load demand is prominent and the flexibility of power grid is poor in “three-north area” of China. And the wind power curtailment of wind farms is serious, one of the important causes is that the thermoelectric units operate in the mode of “determining power generation by heat” in winter, resulting in the reduction of their peak load regulation capacity. Applying regenerative electric boilers for heating and transferring the electric energy into heat energy can improve the local accommodation ability of wind power. However, the power regulation of electrode heating-based regenerative electric boiler is limited by its mechanical components and the frequent adjustment of electrode will seriously affect the service life of regenerative electric boilers. A multi-objective optimization control method of wind power consumption based on regenerative electric boiler system integrated with large-scale energy storage is proposed with the maximum wind power consumption and the minimum regulating times of electrode as its objectives, by introducing the electrochemical energy storage with fast and flexible power adjustment ability into the regenerative electric boiler system to consume wind power. Simulative results show that the proposed method can take both the wind power consumption of regenerative electric boiler system and the regulating times of electrode into account, solving the mismatching problem between the power regulation capacity of regenerative electric boiler and the variation of wind power effectively.

**Key words:** wind power consumption; large-scale energy storage; regenerative electric boiler; optimization control; multi-objective optimization; regulating times; models