

光伏接入牵引供电系统谐波交互影响及其适应性分析

邓文丽,戴朝华,郭爱,时方力,韩春白雪,郭明亮,薛聪聪

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:为了分析光伏接入牵引供电系统的谐波交互影响及其适应性,基于谐波传输理论,建立了系统谐波电流分析模型;利用 MATLAB/Simulink 搭建了光伏-全并联自耦变压器牵引网-动车组耦合系统的联合仿真模型,并验证了模型的准确性;在此基础上,分别针对牵引侧、光伏侧的动态工况进行仿真,对比分析了光伏接入前/后系统谐振及谐波放大特性、牵引网稳态电压分布、不同母线侧谐波电压/电流畸变情况以及光伏逆变器的耐受能力。通过实测数据对牵引供电系统接纳光伏的能力进行算例分析,结果表明:当光伏的装机容量较小时,光伏发电系统与牵引供电系统之间谐波的交互影响较小,两者均表现出较好的适应性。

关键词:光伏发电;牵引供电系统;背靠背逆变器;谐波交互影响;适应性分析

中图分类号:U 224.8;TM 615

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.027

0 引言

光伏(PV)接入牵引供电系统不仅有利于铁路绿色发展,也可促进光伏电能的就近消纳^[1-3]。目前广泛应用于高速、重载铁路的交直交型机车,虽已具备功率因数高、谐波含量低的特点,但其谐波频谱变宽,加之负荷移动方式的复杂性、多变性,所引入的谐波在结构复杂的牵引网的传播过程中,可能会出现谐波谐振及放大现象^[4-5]。另一方面,光伏逆变器也会带来由死区引起的低次谐波以及由调制引起的高次谐波,同时光伏发电受气象条件影响明显,具有间歇性、波动性,亦会导致产生的谐波电流含量呈现动态变化^[6-7]。光伏的接入将使系统中的谐波源由原本的电力机车变为电力机车与光伏逆变器的相互叠加,在牵引网线上更易发生谐波谐振与放大,进而使系统的各部分,即三相公用电网、车网系统、光伏发电系统之间产生谐波的交互影响,同时光伏侧及牵引侧的动态变化也会对系统各部分的适应性造成影响,因此亟需对这一问题进行深入的研究。

由于光伏接入牵引供电系统仍属于崭新的研究方向,目前能够涉及的相关研究刚刚起步。文献[8]提出了一种用于光伏牵引供电系统的一体化变换装置,设计了一种背靠背结构,能够在实现光伏接入的同时对牵引供电系统的无功、负序进行综合补偿;文献[9]提出了一种适用于电气化铁路的背靠背光伏发电系统及其控制策略,在自发自用的发电模式下,可实现光伏电能的就近消纳;文献[10]介绍了德国铁路中将光伏发电系统直接接入牵引供电系统的2种形式,通过单相逆变技术可实现在铁路沿线的任意位置处接入光伏发电系统;文献[11]提

出一种通过逆变和整流技术实现光伏发电系统向3 000 V直流牵引供电系统供电的方案,但直流与交流牵引供电系统之间仍存在本质上的差别。上述研究主要集中关注光伏接入的总体形式及控制策略。目前虽已有单独针对高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性^[4-5,12-14]、光伏电站与配电网谐波传输特性的研究^[7,15],但尚未见针对光伏接入牵引供电系统后谐波的交互影响及系统适应性方面的研究。

基于此,本文首先构建光伏接入牵引供电系统的谐波电流等效模型,理论分析了光伏接入前、后系统的谐波电流传输特性;基于 MATLAB/Simulink 建立了光伏-全并联自耦变压器 AT(Auto-Transformer)供电牵引网-动车组耦合系统的联合仿真模型,并通过给定工况验证了模型的准确性;考虑多类运行工况并结合实测数据,从系统谐振及谐波放大特性、牵引网稳态电压分布、不同母线侧电压电流畸变、光伏电能消纳等角度,对光伏接入后谐波的交互影响及系统适应性进行了理论及仿真分析。这为评估牵引供电系统接纳光伏的能力、制定相关电能质量限值标准及研制新型并网逆变器提供了研究思路。

1 耦合系统结构及谐波传输特性分析

1.1 光伏接入牵引供电系统拓扑结构

由于实际运行中两供电臂上的牵引负荷表现出强烈的波动性及不对称性^[4-5],这种特殊性迫使光伏发电系统难以通过主流的单相、三相并网逆变器直接接入牵引供电系统。故本文在文献[9]所提铁路牵引用背靠背光伏发电系统的基础上,进行了进一步的深入研究,提出光伏接入牵引供电系统的拓扑结构见图1,其主要包括背靠背光伏发电系统、光伏侧降压变压器、牵引变电所 PS(Power Substation)、全并联 AT 供电牵引网、电力机车等。图中, U_{α} 、 U_{β} 分别为 α 相、 β 相供电臂的电压; $I_{\alpha c}$ 、 $I_{\beta c}$ 分别为 α 相、 β 相逆变器在牵引侧的等效输出电流; I_{α} 、 I_{β} 分

收稿日期:2018-07-26;修回日期:2019-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307144)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307144)

别为 α 相、 β 相牵引负荷电流。光伏阵列首先通过 DC/DC 变换器完成升压、最大功率点跟踪 (MPPT), 再利用一组背靠背逆变器实现光伏电能的动态分配, 然后通过 2 台降压变压器跨接于两供电臂的首端, 与原有牵引供电系统一起为电力机车供电。

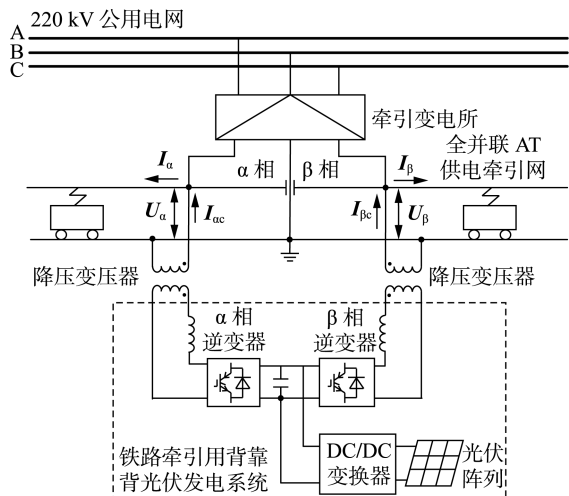


图 1 光伏接入牵引供电系统拓扑图

Fig.1 Topology of PV generation system accessing to traction power supply system

1.2 谐波传输特性分析

光伏发电系统与电力机车在运行过程中均会向系统注入谐波, 叠加后的谐波会对车网系统、220 kV 主网、接入的光伏发电系统造成不良的影响, 尤其是当注入谐波的频率与系统参数相匹配时, 将会引发谐振, 导致谐波进一步放大^[7,12]。因牵引供电系统的两供电臂具有相对独立性, 对 β 相机车两侧的线路进行 π 型稳态等值, 考虑到光伏发电系统就近直接接入牵引侧, 简化处理主要考虑降压变压器的等效阻抗。耦合系统的谐波电流等效电路如图 2 所示, 基于该等效电路分析光伏接入前、后系统的谐波电流传输特性。

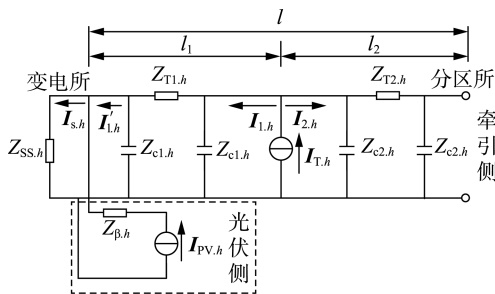


图 2 耦合系统的谐波电流等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of harmonic current in coupling system

图 2 中, l 为牵引网的总长度; l_1 、 l_2 分别为机车距光伏接入点、分区所 (SP) 的距离; $I_{T,h}$ 为机车注入的 h 次谐波电流; $I_{PV,h}$ 为光伏系统注入的 h 次谐波电流; $I_{s,h}$ 为流入系统的 h 次谐波电流; $Z_{SS,h}$ 为系统 h 次

等效谐波阻抗, 包括电源、牵引变压器的等效阻抗; $Z_{\beta,h}$ 为光伏侧降压变压器的 h 次谐波阻抗; $Z_{T1,h}$ 、 $Z_{T2,h}$ 、 $Z_{c1,h}$ 、 $Z_{c2,h}$ 为牵引网线路的 h 次等效阻抗参数。

牵引网线路的等效基波阻抗为^[12]:

$$\begin{cases} Z_{T1} = \frac{2Z_0 [\cosh(\gamma l_1) - 1]}{\sinh(\gamma l_1)}, & Z_{c1} = \frac{\sinh(\gamma l_1)}{2Z_0} \\ Z_{T2} = \frac{2Z_0 [\cosh(\gamma l_2) - 1]}{\sinh(\gamma l_2)}, & Z_{c2} = \frac{\sinh(\gamma l_2)}{2Z_0} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $Z_0 = \sqrt{Z/Y}$ 为牵引网线路的特征阻抗, Z 为牵引网线路单位长度的等值阻抗, Y 为单位长度的等值导纳; $\gamma = \sqrt{ZY}$ 为牵引网线路的传播系数。

$$Z_{T1,h} = \sqrt{h} R_{T1,h} + jh X_{T1,h} \quad (2)$$

其中, $R_{T1,h}$ 为等效 h 次谐波电阻; $X_{T1,h}$ 为等效 h 次谐波电抗。 $Z_{T2,h}$ 、 $Z_{c1,h}$ 、 $Z_{c2,h}$ 、 $Z_{SS,h}$ 的计算与之类似。

接入光伏发电系统前, 牵引网的谐波电流放大倍数为:

$$A_{I,h} = \frac{I_{s,h}}{I_{1,h}} = \frac{I'_{1,h}}{I_{1,h}} = \frac{Z_{0,h} \cosh(\gamma l_2)}{Z_{SS,h} \sinh(\gamma l) + Z_{0,h} \cosh(\gamma l)} \quad (3)$$

$A_{I,h} > 1$ 表示系统放大了该次谐波电流, 反之表示衰减了该次谐波电流。

接入光伏发电系统后, 牵引网的谐波电流放大倍数为:

$$A'_{I,h} = \frac{I_{s,h}}{I_{1,h}} = \frac{I'_{1,h} - I'_{PV,h}}{I_{1,h}} \quad (4)$$

其中, $I'_{PV,h}$ 为流入光伏系统的 h 次谐波电流。

由式(3)、(4)可知, 谐波电流放大倍数受牵引网长度、机车位置、系统阻抗、光伏侧降压变压器阻抗等影响, 在接入光伏发电系统后, 由于光伏侧分担了一部分谐波电流, 则牵引网的谐波电流放大倍数较接入光伏发电系统前有所降低。

耦合系统的谐振频率可表示为:

$$\varphi = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{SS} C}} \quad (5)$$

其中, $L_{SS} = Z_{SS}/\omega$ 为牵引变压器的电感, Z_{SS} 为系统阻抗, ω 为系统角频率; C 为牵引侧等效电容。

对应图 2 所示 2 个谐波源的频率相同但相位角不确定的谐波电流, 可根据式(6) 计算两者在一条线路同一相上相叠加。

$$I_h = \sqrt{I_{PV,h}^2 + I_{T,h}^2 + K_h I_{PV,h} I_{T,h}} \quad (6)$$

其中, I_h 为 2 个谐波源叠加后的 h 次谐波电流; K_h 为 h 次谐波系数。

2 耦合系统的联合仿真模型

2.1 铁路牵引用背靠背光伏发电系统建模

背靠背光伏发电系统的 DC/DC 变换器所实现

的升压和 MPPT 功能与常用的光伏发电系统的控制策略类似^[16],但为了适应铁路牵引供电系统这种特殊的应用环境,其核心部分还包括背靠背逆变器,用于实现光伏电能的动态分配。

背靠背逆变器的控制原理见图 3, 通过电压电流双闭环方法进行控制, 电压外环实现直流侧电压的建立与稳定, 并提供电流内环的参考值; 电流内环控制逆变器的输出电流跟踪其参考值, 直流侧电压由 α 、 β 相逆变器协同控制, 直流侧电压与参考值间的差值可用于表征逆变器与外界之间有功功率流动的需求量。为了实现光伏电能的动态分配, 同时鉴于目前尚无相关政策支持光伏发电系统通过牵引变电站向电力系统反送电能, 按式 (7) 动态控制 α 、 β 相逆变器最大输出电流的幅值, 以避免反送电现象发生, 其中未消纳的电量进行必要的弃电处理。

$$I_{\alpha \text{cp, lim}} = \sqrt{2} P_{\alpha} / U_{\alpha}, \quad I_{\beta \text{cp, lim}} = \sqrt{2} P_{\beta} / U_{\beta} \quad (7)$$

其中, $I_{\alpha\text{cp_lim}}$ 、 $I_{\beta\text{cp_lim}}$ 分别为 α 相、 β 相逆变器输出电流幅值限值; P_{α} 、 P_{β} 分别为 α 相、 β 相供电臂实时所需的有功功率。

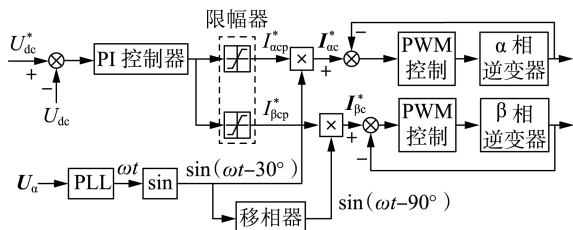


图3 背靠背逆变器的控制原理

Fig.3 Control principle of back-to-back inverter

为了验证所搭建背靠背光伏发电系统及其控制方法的准确性,通过给定两供电臂的运行工况用以模拟不同的场景,详细验证过程见附录 A。为了分析光伏发电系统的动态特性,利用式(8)对其输出功率进行估算^[17]。

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{S_{ref} [1 + k(T_{STC} - T_{ref})]}{S_{STC}} \quad (8)$$

其中, P_{PV} 为光伏发电系统的输出功率; T_{ref} 为光伏电池表面的温度, 可由式 (9) 进行估算^[17]; S_{ref} 为光伏电池所接受的总辐射光照强度; T_{STC} 、 S_{STC} 分别为标准测试条件下的温度、辐照度, 本文分别取为 25 ℃、1 000 W/m²; P_{STC} 为标准测试条件下光伏发电系统的最大功率, 即光伏装机容量。

$$T_{\text{ref}} = T_{\text{air}} + S_{\text{ref}} e^{-3.473 - 0.059 4v_{\text{FF}}} \quad (9)$$

其中, v_{FF} 为光伏发电系统附近的风速; T_{air} 为空气温度。

2.2 全并联 AT 供电牵引网建模

为了保证列车高速、安全运行,我国铁路普遍采用全并联 AT 供电技术^[12-14]。而全并联 AT 供电牵

引网作为牵引变电所与电力机车交换电能的重要通道,其具有复杂的几何结构及电气特性。由于导线数目较多,若不进行适当的降阶处理,将会对理论及仿真分析造成计算负担。

故本文在建立牵引网模型时,将同一线路的承力索按多导体传输线电感矩阵法^[5,12]等效至接触线,将埋地线、保护线等效至钢轨,因此牵引网可等效为链式平行八导体线路模型,包括:上、下行接触线 T_1 和 T_2 ,加强导线 A_1 、 A_2 ,馈线 F_1 、 F_2 ,钢轨 R_1 、 R_2 ,上、下行线路在 AT 处通过横连线实现并联。图 4 为某变电所 β 相供电臂的等效模型(α 相供电臂的结构与之类似)。由于牵引变电所、AT、分区所等横向并联元件之间的距离较短,一般为 10~15 km,在横向并联元件之间利用高精度的 π 型等值电路已能实现传输线路的精确建模^[13]。因此,本文在对牵引网进行切割时,切面的选取一方面利用牵引变电所、AT、分区所作为自然切割点,另一方面为了便于观测光伏发电系统接入后网线上各段内的电气分布特性,在无横向并联元件的线段内以 5 km 长度进行切割,如图 4 所示。这种切面选取方法并不会对模型的精度造成影响。

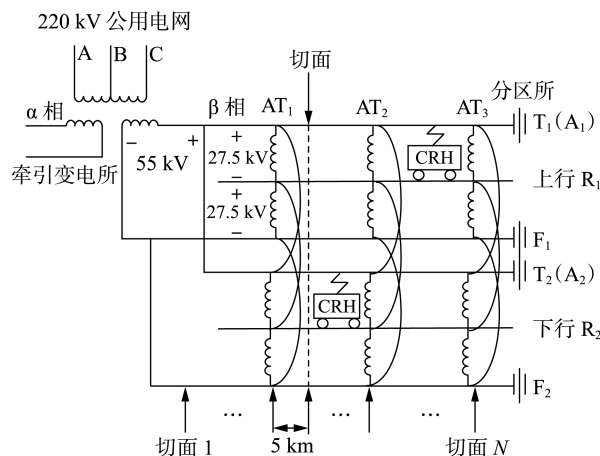


图 4 全并联 AT 供电牵引网示意图

Fig.4 Schematic diagram of all-parallel AT power supply traction network

相邻两切面间的输电线路利用 π 型等值电路连接,构成如附录 B 中图 B1 所示的牵引网链式模型,利用等值电路可建立系统的节点导纳方程,基于 Carson 定理^[12-14],利用各输电线路的参数及空间分布位置即可计算得到系统的阻抗、导纳矩阵。主要系统参数如下:公用电网,电压等级为 220 kV,短路容量为 10 GW;V/x 牵引变压器,容量为 50 MV·A,变比为 220 kV/(2×27.5)kV,短路阻抗为 8.4%;AT,容量为 8.5 MV·A,变比为 27.5 kV/27.5 kV,短路阻抗为 1.8%;光伏降压变压器,容量为 1 MV·A,变比为 27.5 kV/1 kV,短路阻抗为 1.8%;光伏发电系统,装机容量为 1 MW_p,直流侧电压为 2 000 V;牵引网

接触线,型号为 TCG-100,导线计算半径为 4.6 mm,直流电阻为 0.179 Ω/km ;牵引网承力索,型号为 TJ-95,导线的计算半径为 4.74 mm,直流电阻为 0.2 Ω/km ;牵引网钢轨,型号为 P60,导线的计算半径为 12.79 mm,直流电阻为 0.135 Ω/km ;牵引网加强导线/回流线,型号为 TGJ-185,导线计算半径为 9.03 mm,直流电阻为 0.163 Ω/km ;CRH2 型动车组,额定功率为 9 600 kW,功率因数滞后 0.98。

2.3 高速动车组负荷建模

考虑到高速动车组是牵引侧的主要谐波源,为了使研究内容更加贴合实际,本文对目前广泛使用的 CRH2 型动车组进行负荷建模。CRH2 型动车组的电力传动系统主要包括受电弓、车载变压器、四象限变流器、中间直流环节、脉宽调制(PWM)逆变器、牵引电机等。由于中间直流环节能够有效地抑制电机侧对网侧系统的影响,机车网侧的高次谐波主要由四象限变流器调制产生,故在进行负荷建模时,可随 PWM 逆变器及牵引电机等部分进行简化处理,利用等效电阻来模拟电机侧负荷,达到在不影响模型精度的前提下提高仿真速度的目的^[5]。

本文所搭建的 CRH2 型动车组的负荷模型如图 5 所示,输入端口 1、2 跨接于接触线 T 与钢轨 R 之间。四象限变流器采用瞬态直接电流控制策略与正弦脉宽调制(SPWM)方法,具体控制原理如下^[18]:

$$\begin{cases} I_{N1} = K_p(U_d^* - U_d) + (1/T_i) \int (U_d^* - U_d) dt \\ I_{N2} = I_d U_d / U_N \\ I_N^* = I_{N1} + I_{N2} \\ u_{ab}(t) = u_N(t) - \omega L_N I_N^* \cos(\omega t) - G_2 [I_N^* \sin(\omega t) - i_N(t)] \end{cases} \quad (10)$$

其中, K_p 、 T_i 为 PI 参数; G_2 为比例放大系数; L_N 为网侧电感; $i_N(t)$ 、 I_N^* 分别为变流器网侧电流的实际值与参考值; I_{N1} 、 I_{N2} 为网侧电流给定值的有效分量; I_d 为中间直流环节的电流; U_d 、 U_d^* 分别为中间直流环节电压的实际值与参考值; $u_N(t)$ 、 U_N 分别为网侧电压的实际值与有效值; $u_{ab}(t)$ 为调制信号。

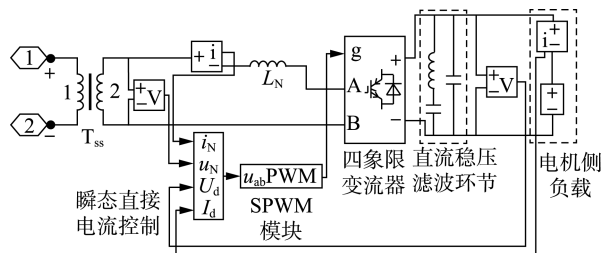


图 5 CRH2 型动车组的负荷模型

Fig.5 Load model of EMU-CRH2

为了验证 CRH2 型动车组负荷模型的准确性,本文对其谐波输出特性进行了仿真分析,详细过程

见附录 C。

3 牵引侧动态工况下的仿真分析

3.1 牵引网长度对系统谐波特性的影响

电气化铁道牵引供电系统单向供电段的长度一般为 20~40 km^[12-13],故本文分别仿真光伏接入处牵引网长度为 20 km、30 km、40 km 时耦合系统的谐振及谐波放大情况,其中机车位于牵引网的末端,主要的系统参数同 2.2 节。图 6 为光伏接入前、后的谐波放大情况。

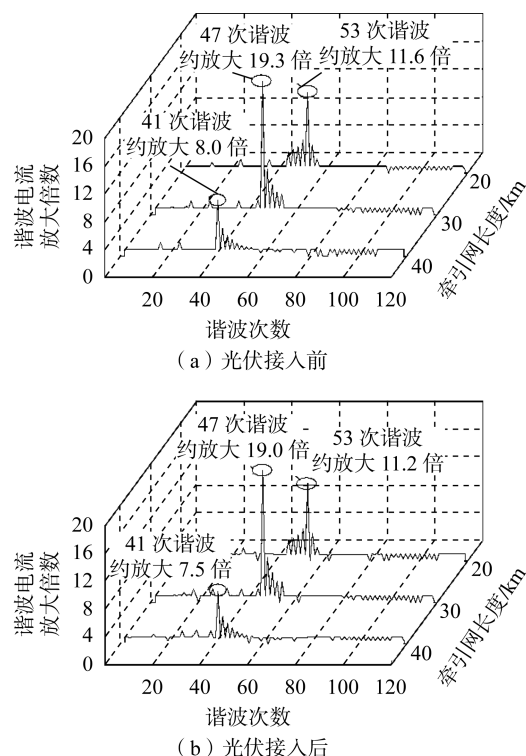


图 6 不同牵引网长度下光伏接入前、后的谐波放大情况

Fig.6 Harmonic amplification before and after integration of PV generation system under different lengths of traction network

由图 6(a) 可知,在光伏接入前,当牵引网的长度为 40 km 时,41 次谐波附近发生谐振,谐波电流约放大 8.0 倍;当牵引网的长度为 30 km 时,47 次谐波附近发生谐振,谐波电流约放大 19.3 倍;当牵引网的长度为 20 km 时,53 次谐波附近发生谐振,谐波电流约放大 11.6 倍。这表明随着牵引网长度的增加,系统的谐振频率会越低。这是因为牵引网的并联分布电容会随着牵引网长度的增加而增加,结合式(5)可知,牵引网分布电容与系统感性阻抗的交截频率将随之降低,与理论推导相符。

由图 6(b) 可知,与光伏接入前相比,在不同牵引网长度下,光伏接入后系统的谐振频率均未发生变化,由 1.2 节的理论分析知,本文所研究的光伏发电系统采用就近接入的方式,相对于牵引网的长度而言,光伏接入的线路对地电容可忽略,同时光伏发

电系统的装机容量较小,系统内部的容性支路较小,故对牵引侧分布式电容的影响甚微,并未造成牵引网谐振点发生偏移。但对比谐波放大倍数可发现,光伏接入后整体的谐波放大倍数均呈现下降趋势,这是因为光伏侧分担了一部分谐波电流,与理论分析相符。同时从图中可看出,光伏系统的接入为原有的牵引系统额外地引入了一定量其他次数的谐波。

3.2 机车位置变化对牵引网电压及系统谐波畸变的影响

机车位置变化会影响牵引网电压的分布,为考察光伏接入后机车位置变化对牵引网电压的影响情况,设定牵引网长度为 30 km,分别选取牵引网上无机车经过、机车置于光伏接入点及机车距离光伏接入点 15 km、30 km 处这 4 种典型工况(工况 1—4),对比分析光伏接入前、后牵引网电压的分布情况,结果如图 7 所示。

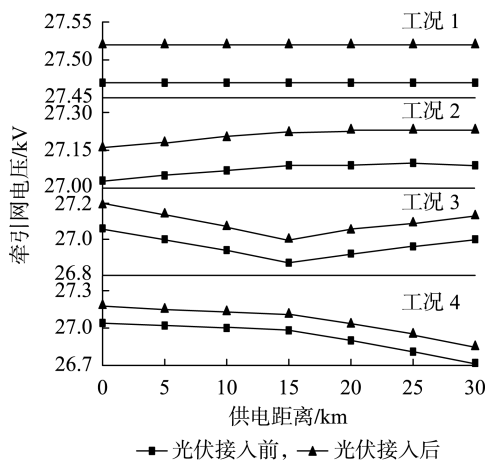


图7 光伏接入前、后机车位置变化对牵引网电压分布的影响

Fig.7 Influence of locomotive position change on distribution of traction network voltage before and after integration of PV generation system

由图 7 可知,光伏系统接入前,当牵引网上无机车经过时,整体牵引网电压维持在 27.47 kV;当牵引网上有机车经过时,整体牵引网电压随机车距光伏接入点距离的增加而降低,且在每种工况下牵引网电压的最低值出现在机车所在位置,之后牵引网电压出现一定程度的上升,这是因为 AT 对牵引网电压有支撑作用。仿真结果也说明了本文所搭建的牵引网系统具有较好的稳定性。在接入光伏发电系统后,牵引网电压会有所上升,这是因为光伏提供的额外电流使牵引供电系统需要外电系统提供的电流减少,牵引变电所及牵引网电压损失将相应降低,则整体牵引网电压升高,但电压上升的范围在 0.05~0.14 kV 之间,均未使牵引网电压超过规定的电压上限 29 kV。

图 8 为光伏接入前、后机车位置变化对系统负

序电流及各部分谐波畸变率的影响情况。由图 8 可以看出,当机车距光伏接入点越远时,220 kV 电网侧系统负序电流越小,接入光伏系统可以降低负序电流,起到一定的补偿作用;结合图 7 对牵引网电压稳定性的分析可知,当机车距光伏接入点越远时,其端压越低,从而使其取流畸变率降低,光伏接入会给牵引侧引入部分谐波,但其影响程度较小,光伏接入后机车取流谐波畸变率的上升幅度约为 0.17%;相比于光伏接入前,光伏接入后 220 kV 电网侧电压谐波畸变率虽有一定程度的上升,但机车位置的移动对电压谐波畸变率的变化起主导作用;光伏系统侧输出电流谐波畸变率受机车位置变化的影响较小,均在限制范围 5%之内。

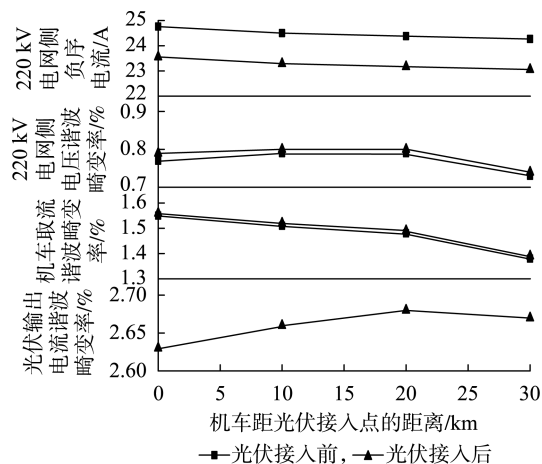


图8 光伏接入前、后机车位置变化对系统负序电流及谐波畸变率的影响

Fig.8 Influence of locomotive position change on system negative sequence current and harmonic distortion rate before and after integration of PV generation system

4 光伏侧动态工况下的仿真分析

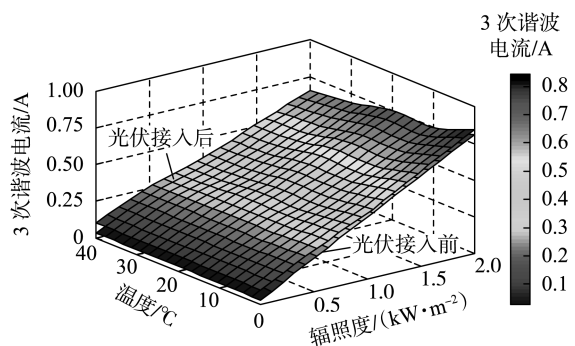
4.1 光伏动态工况下谐波输出特性分析

由式(8)知,光伏出力受电池表面辐照度和温度的影响明显,因此还需分析光伏出力发生波动时不同电压侧母线上的谐波情况、牵引网电压的动态稳定性以及牵引供电系统接纳光伏的能力。设定牵引网长度为 30 km,机车置于线路末端,光伏板的温度及辐照度设置为外部变量,用以模拟外界气象条件的动态变化。

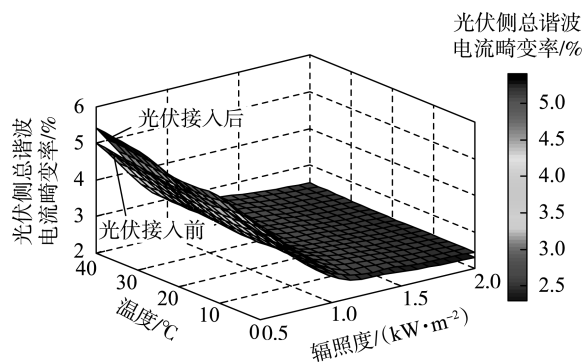
分析光伏系统动态工况下谐波电流输出特性,见图 9(a),取谐波含量较高的 3 次谐波电流进行分析。对比光伏接入前、后 3 次谐波电流输出特性可知,光伏接入前,谐波电流随辐照度的增加而增加,随温度的升高而降低,从整体上看,辐照度的变化起主导性作用,而温度的影响程度较小。光伏接入后的谐波电流与光伏接入前的谐波电流有相同的变化趋势,但含量有一定程度的上升,结合式(6)所示理

论分析可知,两者间的差值是由牵引侧背景谐波电流造成的。又由 2.3 节的分析可知,目前高速动车组的谐波含量较少,故对光伏侧的影响相对较小。

在此基础上,分析光伏接入前、后光伏侧总谐波电流畸变率随气象条件动态变化的情况,如图 9(b)所示。在光伏接入前,光伏侧谐波电流畸变率随辐照度的增加而降低,随温度的升高而微小增加。在辐照度低于 1 kW/m^2 的条件下,谐波电流畸变率的变化幅度明显,在低辐照度、高温运行工况下,谐波电流畸变率最大达到 5%,有超过限值 5% 的趋势;而在光伏接入后,牵引侧的背景谐波恶化了这一趋势,谐波电流畸变率最大达到 5.41%。



(a) 光伏系统谐波电流输出特性



(b) 光伏接入前、后光伏侧谐波电流畸变率

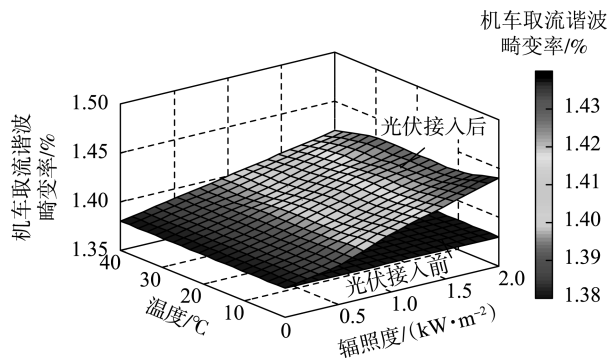
图 9 气象条件变化对光伏系统的影响

Fig.9 Influence of meteorological condition variation on PV generation system

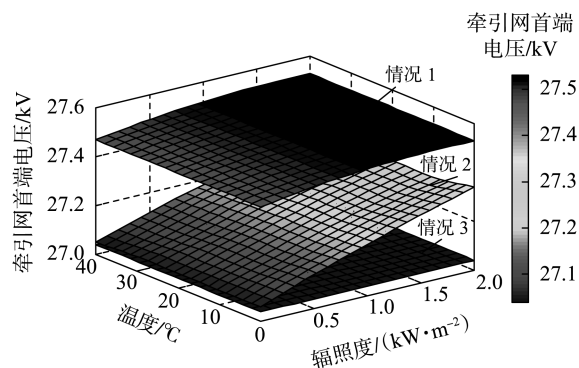
4.2 光伏动态工况对车网系统的影响

当光伏输出随气象条件发生波动时,对车网系统的影响主要表现为 2 个方面:对机车取流谐波畸变率的影响,对牵引网电压的影响。结果见图 10。

机车整流环节大多采用瞬态直接电流控制,网侧电流的谐波含量会对其控制性能产生直接的影响。由图 10(a)可知,机车取流谐波畸变率随着辐照度的增加而增加,随温度的升高而略有降低,结合图 9(a)所示光伏系统的谐波输出特性易知,随着辐照度的增加,光伏输出电流中的谐波含量增加,则传递至机车的谐波也将增加,机车取流谐波畸变率上升,上升幅度为 0.06%。可见光伏系统对机车取流



(a) 对机车取流谐波畸变率的影响



(b) 对牵引网电压的影响

图 10 光伏侧波动对车网系统的影响

Fig.10 Influence of PV-side fluctuation on locomotive-network system

谐波畸变率的影响程度相对较小。

另一方面,牵引网电压的稳定是机车安全运行的必要保证,结合 3.2 节的分析,选取 2 种具有代表性的工况:工况 a 为线路空载,工况 b 为机车运行于牵引网末端。在此基础上,图 10(b)从 3 种情况考察了光伏波动对牵引网首端电压的影响。情况 1 为工况 a 下牵引网电压的分布情况,因此工况下光伏仅为牵引网提供空载损耗所需的电能,多余电量并不存在“外送”现象。具体而言,当辐照度小于 0.5 kW/m^2 时,牵引网电压会随辐照度的增加而有小幅度抬升,这是因为此时的光伏出力较小,还不足以完全提供空载损耗所需的电能;当辐照度大于 0.5 kW/m^2 时,牵引网电压基本维持在 27.53 kV ,整个波动过程中并未出现牵引网电压的风险。情况 2 为光伏接入后在工况 b 下牵引网电压的分布情况,易知牵引网电压会随着辐照度的增加而升高,随温度的升高而略有降低,这是因为当辐照度上升时,光伏出力增加,光伏向牵引供电系统提供额外电流的能力增加,则牵引供电系统需要外电系统提供的电流将减少,牵引网的压降随之降低,则整体牵引网电压升高,最大值 27.34 kV 出现在高辐照度、低温工况下。情况 3 为光伏接入前在工况 b 下牵引网电压的分布情况。由图 10(b)可知,相较于情况 3,情况 2 下的牵引网电压有 0.3 kV 的涨幅。故光伏的接入

在一定程度上还可对机车运行时的牵引网电压起到支撑作用。

4.3 光伏动态工况对 220 kV 电网侧的影响

因国家电网公司会对电气化铁路 220 kV 侧供电母线的电压/电流总谐波畸变率、负序电流等电能质量指标进行考核,因此还需分析光伏波动对此类指标的影响。图 11(a)为 220 kV 电网侧的电压、电流总谐波畸变率,由图可知电流总谐波畸变率会随辐照度的增加而增加,随温度的降低而略微增加,这是因为当光伏出力增加时,220 kV 电网侧供电母线输出的电流减小,但传输的谐波含量却增加了;而电压总谐波畸变率基本维持在 0.74% 左右,这是因为 220 kV 电网侧为强电网,谐波阻抗较小,供电母线上的电压畸变相对较小。

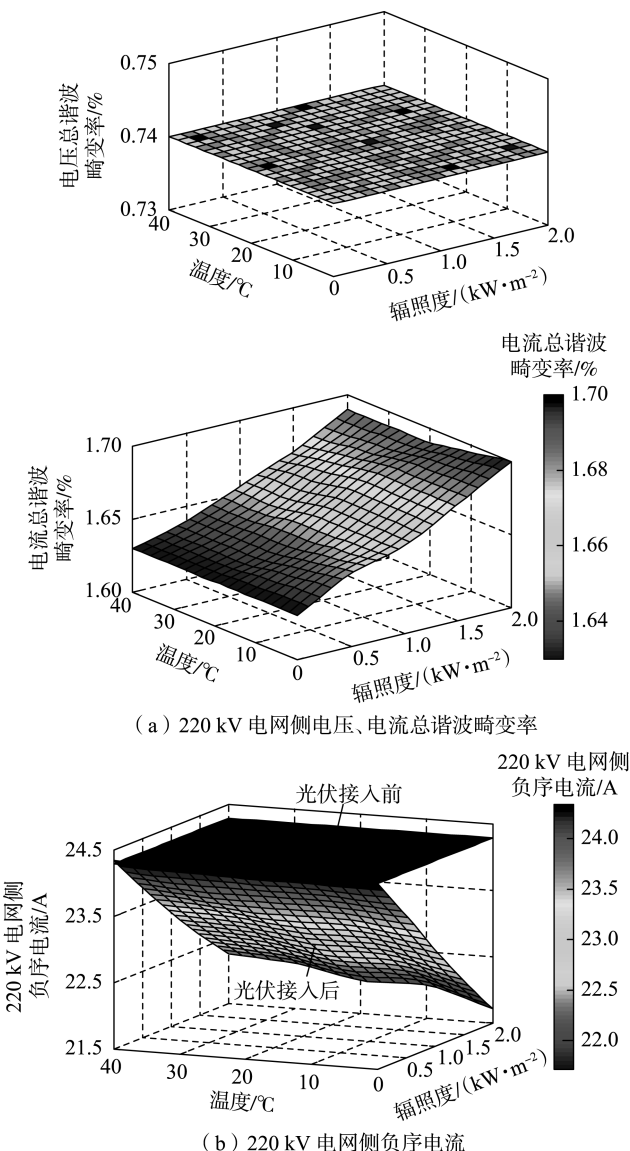


图 11 光伏侧波动对 220 kV 电网侧的影响

Fig.11 Influence of PV-side fluctuation on 220 kV power grid

图 11(b)为 220 kV 电网侧的负序电流,由图可知光伏接入前的负荷电流为 24.29 A,因背靠背光伏

发电系统可实时跟踪两供电臂的牵引负荷,实现有功功率的动态分配,进而减小 220 kV 电网侧的负序电流,其减小程度随光伏出力的增加而增加,下降幅度达 2.57 A。

4.4 牵引供电系统接纳光伏能力分析

电气化铁路的牵引负荷按行车运行图(图 12(a)),以 1 d 为周期进行固定、准确的运行。为了分析牵引供电系统接纳光伏的能力,取某牵引变电所的典型日负荷曲线,见图 12(a)。利用 Meteonorm 7 获取该地全年的气象数据,结合式(8)、(9)对光伏系统全年的消纳情况进行分析,算例分析结果如图 12(b)所示,光伏发电系统的年发电量为 1 054.2 MW·h,牵引负荷年消纳电量为 1 046.55 MW·h,未消纳电量为 7.65 MW·h,年未消纳率为 0.73%,可见牵引供电系统消纳光伏的能力较好。

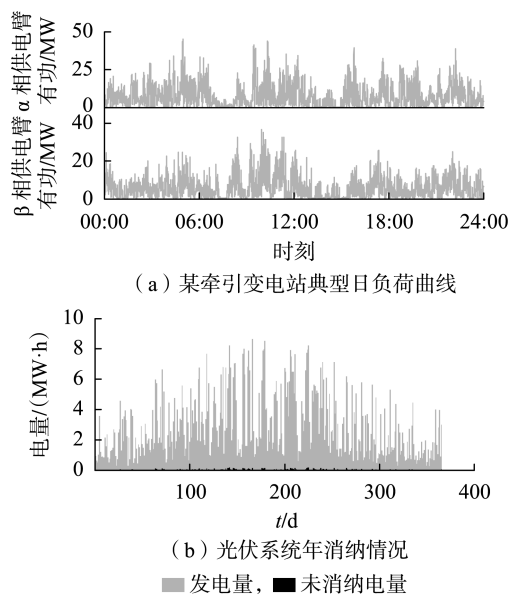


图 12 牵引供电系统接纳光伏能力的分析结果

Fig.12 Analysis results for PV generation accommodation ability of traction power supply system

综上可知,当光伏发电系统的装机容量较小时,光伏发电系统与牵引供电系统之间的交互影响较小,同时牵引供电系统也能够较好地消纳光伏电能,具有较强的适应性。

5 结论

本文利用 MATLAB/Simulink 建立了光伏-全并联 AT 牵引网-动车组的联合仿真模型,并验证了该模型的准确性;在此基础上,仿真分析了不同牵引网长度、不同机车位置、光伏出力随温度及辐照度动态变化工况下,光伏接入前、后系统的谐波输出特性及其适应性。由理论推导和仿真结果所得结论如下。

a. 由于光伏采用就近接入的方式且装机容量较小,并未造成牵引网谐振点的偏移,但整体谐波放大倍数呈下降趋势,与理论分析相符;光伏的接入会使

牵引网电压有所抬升,但均在限制范围内,还可在一定程度上对机车运行时的牵引网电压起到支撑作用;机车位置的变化对牵引网电压分布的影响起主导作用。

b. 当光伏出力随气象条件动态变化时,车网系统、220 kV 电网侧、光伏侧三者之间谐波的交互影响较小;算例分析结果亦表明,此时牵引供电系统也能够较好地接纳光伏电能。

c. 实际应用中需结合光伏接入处的牵引侧背景谐波含量设计逆变器的耐受畸变电流、电压的能力;由仿真结果可推导得知,牵引供电系统能够接纳小容量的光伏系统,但当其容量增大或采用较长架空线传输电能时,相关电能质量问题将会更加突出,此时的适应性问题还需结合实测数据进行综合考察。

d. 所搭建的联合仿真模型可用于深入研究耦合系统的谐波交互影响及其适应性,对评估牵引供电系统接纳光伏的能力、制定相关电能质量限值标准及研制相应的治理设备有一定的实用参考价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 鞠平,沈斌,吴峰. 综合能源电力系统的在线分布互联建模研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):11-14.
JU Ping, SHEN Fu, WU Feng. Research on distributed and interconnected online modeling of PS-IE[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 11-14.
- [2] 王淑娟,景芳毅. 从度电成本分析光伏平价的路径[J]. 太阳能,2016(8):9-16.
- [3] 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):29-34.
ZHOU Xinjun. A study on potential for using new energy and renewable energy sources in railways[J]. Sino-Global Energy, 2016, 21(5): 29-34.
- [4] 刘浅,高仕斌,李丹丹. 高速铁路高通滤波器接入位置研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):157-163.
LIU Qian, GAO Shibin, LI Dandan. Installation location of high-pass filter in high-speed railway[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 157-163.
- [5] 崔恒斌,冯晓云,林轩,等. 牵引网与交直列车耦合系统谐波谐振特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2736-2745.
CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, LIN Xuan, et al. Simulation study of the harmonic resonance characteristics of the coupling system with a traction network and AC-DC-AC trains[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2736-2745.
- [6] 刘军锋,李叶松. 死区对电压型逆变器输出误差的影响及其补偿[J]. 电工技术学报,2007,22(5):117-122.
LIU Junfeng, LI Yesong. Dead-time influence on output error of voltage source inverter and compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 117-122.
- [7] 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.
- [8] 戴朝华,郭明亮,陈维荣,等. 一种用于牵引供电系统的一体化变换装置:ZL 201621437699.9[P]. 2017-06-20.
- [9] 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):541-547.
WU Mingliang, DAI Chaohua, DENG Wenli, et al. Back-to-back PV generation system and its control strategy for electrified railway[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 541-547.
- [10] MAYER O, LYNASS M, GOMEZ M, et al. Design aspects for high voltage MW PV systems for railway power supply[C]//29th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Amsterdam, Netherlands: [s.n.], 2014:2876-2879.
- [11] CARACCILO M B, FARANDA R, LEVA S. Photovoltaic applications in railway stations[C]//International Conference on Electricity Distribution. [S.l.]: IEEE, 2007:1-6.
- [12] 何正友,胡海涛,方雷,等. 高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(16):55-62.
HE Zhengyou, HU Haitao, FANG Lei, et al. Research on the harmonic in high-speed railway traction power supply system and its transmission characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 55-62.
- [13] 崔恒斌,冯晓云,林轩,等. 车网耦合下高速铁路牵引网谐波谐振特性研究[J]. 电工技术学报,2013,28(9):54-64.
CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, LIN Xuan, et al. Research on harmonic resonance characteristic of high-speed railway traction net considering coupling of trains and traction nets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 54-64.
- [14] 胡海涛,何正友,张民,等. 高速铁路全并联 AT 供电系统串联谐振分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):52-60.
HU Haitao, HE Zhengyou, ZHANG Min, et al. Series resonance analysis in high-speed railway all-parallel AT traction power supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 52-60.
- [15] 谢宁,罗安,陈燕东,等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):10-17.
XIE Ning, LUO An, CHEN Yandong, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-17.
- [16] 薛阳,汪莎. 基于扰动观察法的模糊控制应用于光伏发电最大功率跟踪[J]. 太阳能学报,2014,35(9):1622-1626.
XUE Yang, WANG Sha. Fuzzy control based on P&O applied in photovoltaic maximum power tracking[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(9): 1622-1626.
- [17] 丁坤,翟泉新,张经纬,等. 一种光伏组件输出功率的估算模型[J]. 可再生能源,2014,32(3):275-278.
DING Kun, ZHAI Quanxin, ZHANG Jingwei, et al. An estimation model for PV module output power[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(3): 275-278.
- [18] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京:高等教育出版社,2009:97-105.

作者简介:



邓文丽

邓文丽(1994—),女,四川南充人,硕士研究生,研究方向为电气化铁路新能源供电技术(E-mail:1091759831@qq.com);

戴朝华(1973—),男,湖北新化人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统规划与运行优化、新能源发电技术等(E-mail:daichaohua@swjtu.edu.cn)。

Harmonic interaction influence of PV generation system accessing to traction power supply system and its adaptability analysis

DENG Wenli, DAI Chaohua, GUO Ai, SHI Fangli, HAN Chunbaixue, WU Mingliang, XUE Congcong

(College of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to analyze the harmonic interaction influence and its adaptability of PV (PhotoVoltaic) generation system accessing to traction power supply system, the system harmonic current analysis model is established based on harmonic transmission theory. The united simulation model for the coupled system of PV, all-parallel AT (Auto-Transformer) traction network and electric multiple units is set up in MATLAB/Simulink and its accuracy is verified. Based on this, the dynamic working conditions of traction side and PV side are simulated respectively, and the resonance and harmonic amplification characteristics of the system, the steady-state voltage distribution of traction network, the harmonic voltage/current distortion of different bus sides and the resistant ability of PV inverters are analyzed and compared before and after the integration of PV generation system. The accommodation ability of traction power supply system to PV generation is studied based on measured data, and results show that when the installed capacity of PV generation system is smaller, the harmonic interaction influence between traction power supply system and PV generation system is smaller, and both of them show good adaptability.

Key words: photovoltaic power generation; traction power supply system; back-to-back inverter; harmonic interaction influence; adaptability analysis

(上接第180页 continued from page 180)

Optimal operation strategy of PV-energy storage system considering revenue of voltage regulation ancillary service

YUAN Xiaodong¹, YANG Xiaomei², YU Yongzhou³, LU Wentao³, GE Le³

(1. Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

3. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

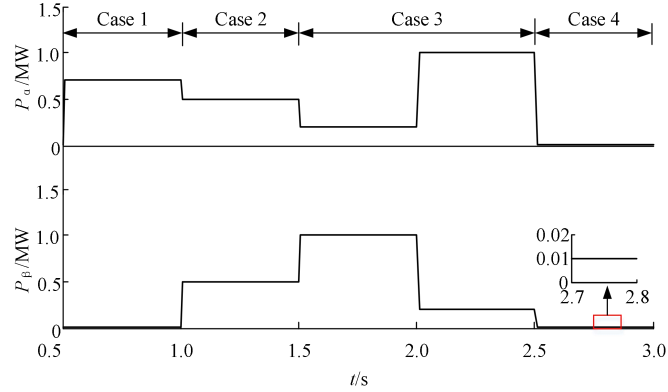
Abstract: The voltage over-limit problem of distribution network with high penetration rate of renewable energy is increasingly serious. PESS (Photovoltaic-Energy Storage System) can provide voltage regulation ancillary service for the power grid due to its four-quadrant PQ adjustment capability. An optimal operation strategy is proposed for PESS considering the revenue of voltage regulation ancillary service. The topology structure and flexible grid-connected operation modes of PESS are given. Considering the on-grid energy income, the ancillary service revenue, the electricity purchasing cost, the loss cost and the operating constraints, the optimal operation model with the maximum economic benefit of PESS as its objective is established. Aiming at the global continuous multi-stage active/reactive power dual decision-making problem, the multi-dimensional dynamic programming algorithm is adopted to solve the problem. The results of case study show that PESS can respond to the price incentive of voltage regulation ancillary service to obtain higher revenue, and solve the voltage over-limit problem of distribution network effectively.

Key words: photovoltaic-energy storage system; flexible grid-connection; voltage regulation ancillary service; multi-dimensional dynamic programming

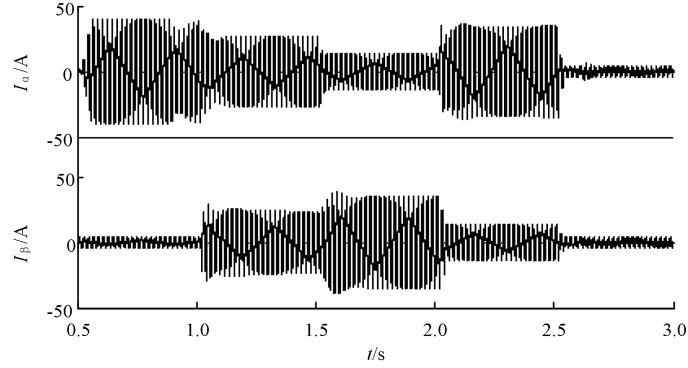
附录

附录 A：背靠背光伏发电系统的模型验证

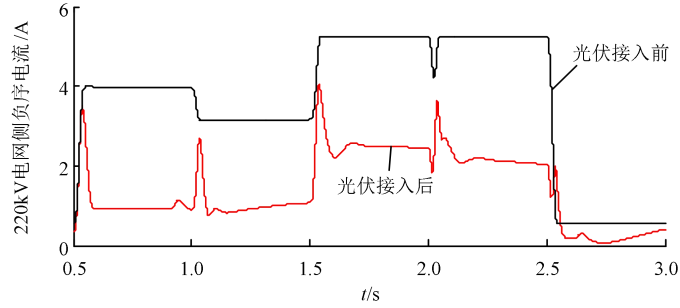
为了验证本文所搭建背靠背光伏发电系统及其控制方法的准确性，给定 α 相、 β 相供电臂的运行工况用于模拟不同的场景，给定的运行工况如图 A1(a)所示。图中，Case 1 为单供电臂空载工况；Case 2 为两供电臂的载荷大致平衡工况；Case 3 为一供电臂重载、一供电臂轻载工况；Case 4 为两供电臂空载工况。此处给定一较小的功率值模拟牵引网的空载损耗，光伏发电系统工作于标准测试条件，仿真结果如图 A1(b)、(c)所示。



(a) 给定的工况



(b) α 相、 β 相逆变器的输出电流



(c) 220kV 电网侧的负序电流

图 A1 给定的工况和仿真结果

Fig.A1 Given conditions and simulative results

从图 A1(b)中可以看出，在给定工况下， α 相、 β 相逆变器的输出电流能够有效地跟踪两供电臂的负荷变动，实现光伏电能的实时动态分配，即当供电臂有机车经过时，光伏系统主动向载荷较大的供电臂分配更多的电能；当供电臂空载时，光伏系统仅向供电臂输出很小的电流，以承担牵引网的空载损耗，未出现反送电现象。从图 A1(c)可看出，接入光伏发电系统后，220kV 电网侧的负序电流明显较接入光伏发电系统前低，说明了该背靠背光伏发电系统在一定程度上能够实现牵引供电系统的负序补偿，降低三相电压不平衡度，故仿真结果

验证了所搭建背靠背光伏发电系统及其控制方法的合理性与准确性。

附录 B：牵引网链式电路模型推导

相邻两切面间的传输线利用 π 型等值电路连接，构成如图 B1 所示的牵引网链式模型，利用等值电路可建立系统的节点导纳方程，即：

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{N-1} \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 + Z_1^{-1} & -Z_1^{-1} & \cdots & & \\ -Z_1^{-1} & Z_1^{-1} + Y_2 + Z_2^{-1} & \cdots & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ & & & Z_{N-2}^{-1} + Y_{N-1} + Z_{N-1}^{-1} & -Z_{N-1}^{-1} \\ & & & -Z_{N-1}^{-1} & Z_{N-1}^{-1} + Y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{N-1} \\ U_N \end{bmatrix} \quad (B1)$$

基于 Carson 定理 利用各传输线路的参数及空间分布位置，即可计算得到式(B1)中的阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 、导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 。

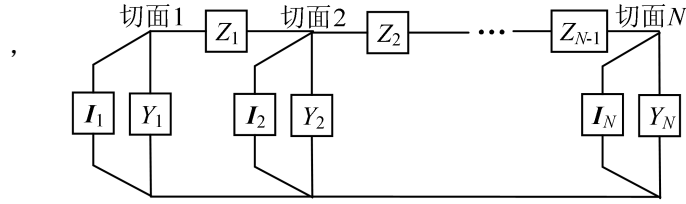


图 B1 牵引网链式电路模型
Fig.B1 Chain circuit model of traction network

附录 C：CRH2 型动车组模型验证

对 CRH2 型动车组的谐波输出特性进行仿真分析，以验证模型的正确性。当供电电压为 27.5kV 理想电压源，四象限变流器的开关频率为 1250Hz，网侧电流谐波频谱分布如图 C1 所示。从图中可以看出，低次谐波主要分布于 3、5、7、9 次，高次谐波主要分布于偶数倍开关频率附近，且主要为奇数次谐波，电流总谐波畸变率为 2.55%，所得仿真结果与文献[12,18]中的结果较为吻合，验证了本文所搭建机车模型的准确性。

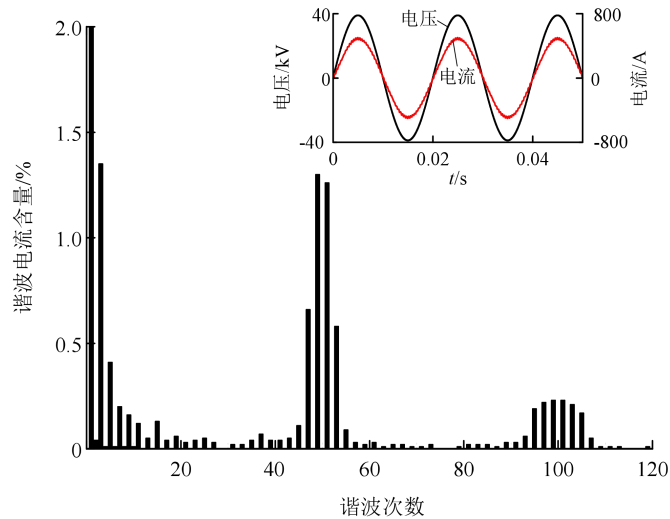


图 C1 网侧谐波电流频率分布
Fig.C1 Network-side harmonic current frequency distribution