

光伏电站与电气化铁路集中接入地区电网稳定性研究

胡仁祥¹, 白生荣¹, 常喜强², 罗金玉¹

(1. 国网吐鲁番供电公司, 新疆 吐鲁番 838000; 2. 国网新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:就“十二五”期间新疆吐鲁番鄯善地区 220 kV 变电站同时接入大规模光伏电站和电气化铁路, 针对两者运行特点, 从理论上分析了光伏电站与电铁牵引负荷集中接入地区电网对稳定运行带来的一些新问题, 并搭建了新疆吐鲁番电网模型, 采用 PSASP 仿真分析的方法, 对电铁牵引负荷与光伏电站集中接入地区电网对稳定性的影响进行了分析和评估。

关键词:光伏电站; 电气化铁路; 集中接入; 仿真; 稳定性

Abstract: Xinjiang Turpan 220 kV substation in Shanshan area will be integrated with large - scale photovoltaic power stations and electrified railway during the "Twelfth Five Year Plan". Aiming at both operating characteristics, some new problems influencing the stable operation of district power grid brought by the concentrated integration with photovoltaic power stations and electrified railway traction load are analyzed theoretically, and the model for Xinjiang Turpan power grid is established. Using the simulation analysis with PSASP, the influences of concentrated integration with electrified railway traction load and photovoltaic power station on the stability are analyzed and evaluated.

Key words: photovoltaic power station; electrified railway; concentrated integration; simulation; stability

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)02 - 0018 - 04

0 引言

随着世界能源危机和全球气候变暖等问题的日益突出, 发展可再生能源已成迫切需要, 其中太阳能光伏发电是再生能源利用的重要形式之一^[2]。现今光伏发电技术取得迅速发展, 许多大规模光伏电站并网运行, 其接入到电力系统的位置多与太阳能资源有关。在光伏电站周围也伴随有铁路的穿越, 铁路的快速发展, 得到电网的不断支持, 电气化铁路得到了迅速的应用和推广。电网企业往往根据电网情况, 在合适的地点接入了光伏电站, 又同时接入了电气化铁路牵引站。目前, 在太阳能资源丰富的新疆, 随着大规模光伏电站的建成投运和兰新电气化铁路的改造建设, 部分地区出现了光伏电站与电气化铁路集中接入电网的情况。光伏电站是一种不稳定电源, 其出力的间隙性、波动性和不可控性对电网有较大影响。同时电铁牵引负荷具有非线性、单相、冲击特性, 在电力机车的运行过程中, 也同样对电网产生较大的影响^[7]。当光伏电站与电铁牵引负荷集中接入地区电网后, 它们在运行过程中既能相互

影响, 又会共同影响电网安全稳定运行。

1 光伏发电系统^[2, 4]

基于换流器并网的三相光伏发电系统由光伏阵列、逆变器及交流电路组成。其中, 交流电路由滤波器和变压器组成。系统组成结构如图 1 所示。

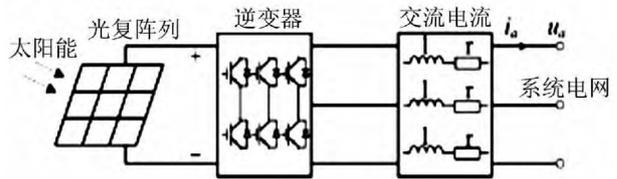


图 1 三相光伏发电系统组成

1.1 光伏阵列模型

光伏阵列由大量光伏组件组成, 其输出电流为

$$I_p = MI_l - MI_0 \left[\exp\left(\frac{q(NV + \frac{I_p R_s N}{M})}{NAkT_p} \right) - 1 \right] - \left[\frac{NV + \frac{I_p R_s N}{M}}{\frac{NR_{sh}}{M}} \right] \quad (1)$$

式中, V 、 I_p 为光伏阵列输出电压和电流; k 为波尔兹曼常数; q 为电荷常数; I_1 为单位光伏组件产生的光电流; I_0 为二极管反向饱和电流; A 为光伏组件的理想因子; R_s 、 R_{sh} 为单位光伏组件的串联合并联阻抗; N 为光伏组件串的串联数; M 为光伏组件串的并联数; T_p 为电池表面温度。

1.2 逆变器模型

采用基于电压源逆变器的光伏并网系统, 根据图1由KCL和KVL得到一组方程。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{l} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} + \frac{u}{l} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\theta = \omega t - \delta \quad (3)$$

$$u = U_c / 2 \quad (4)$$

式中 u_a 、 u_b 、 u_c 为交流母线电压基波分量; i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器三相输出电流; r 、 l 为电阻、电抗; ω 为系统基波角速度; U_c 为逆变器输出电压的基波分量; δ 为 u 和 U_c 之间的相角差。

1.3 光伏发电系统控制模型

光伏发电系统控制方框图如图2所示。三相光伏发电系统采用电流和电压协调控制结构, 电压控制单元(AVR)利用光伏阵列电压与参考值的差值为输入信号, 确定电流控制单元电流输入信号。电流控制单元(ACR)实现逆变器与系统电流的跟踪控制。锁相环节PLL实现电网电压相位的跟踪, 为逆变器提供控制信号。最大功率跟踪(MPPT)负责最大功率点的确定, 完成PWM调制以控制逆变器。

2 电气化铁路供电系统

牵引供电系统^[5]主要由牵引变电所、分区亭及牵引电网组成。牵引网额定电压为25 kV单相, 最高运行电压为27.5 kV。牵引变电所高压侧一般接于110 kV或220 kV电力系统。牵引变电所主变压器低压侧一相接地, 另外两相为两侧单相供电臂的电源。为了减轻高压侧三相不平衡度, 铁路全线所

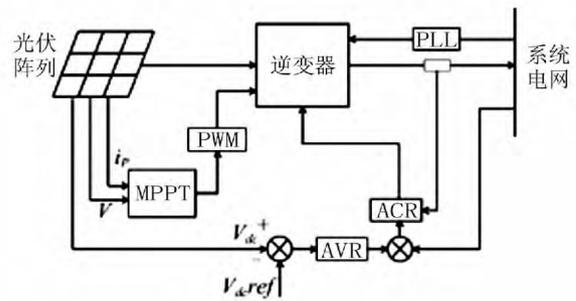


图2 光伏发电系统控制方框图

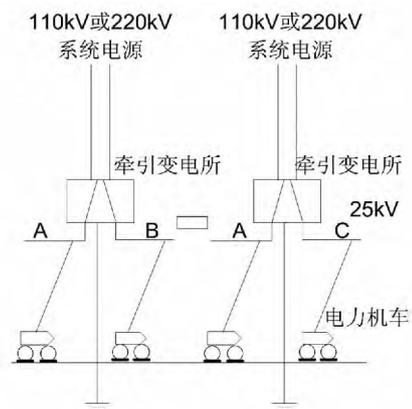


图3 典型牵引供电系统间图

有牵引变电所主变压器低压侧轮换接地, 牵引供电系统两个牵引变电所之间的供电臂在中间设立分区亭, 正常情况下断开运行, 事故情况下, 合闸后可作为两所的相互备用电源。

由于220 kV系统的短路容量大于110 kV系统的短路容量, 接入高电压等级时, 电铁冲击负荷对接入点的电压影响要小于接入低电压等级^[9]。新疆电网的兰新电气化铁路牵引站都是通过接入220 kV变电站接入。

3 电铁负荷对系统无功需求

在电力机车准备进入牵引变电站的供电范围之前, 牵引变基本处于空载状态; 当电力机车滑进牵引变的供电臂时, 立刻需要牵引变提供与电力机车匹配的有功和无功功率; 而电力机车离开牵引变的供电范围时, 牵引变又迅速进入空载状态; 对系统无功表现为明显的阶梯状动态无功功率需求^[9]。图4所示为典型电气化铁路牵引站的无功变化波形。从图4中可看出电铁负荷的无功功率表现为明显的阶梯状态。

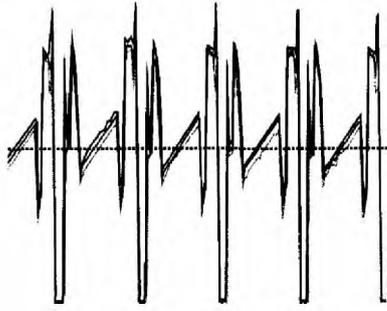


图 4 典型电气化铁路牵引站无功功率波形

4 光伏电站与电铁集中接入地区电网仿真分析

“十二五”期间新疆吐鲁番鄯善红山口地区首座通过 220 kV 升压站对网并网接入光伏发电电站。9 座光伏电站(180 MWp) 升压后,通过 LGJ-2×300 导线 9.6 km 接入新疆主网 220 kV 柯柯亚变电站,同时兰新铁路 220 kV 巴哥牵引站、连木沁牵引站也接入 220 kV 柯柯亚变电站,接入系统示意图如图 5 所示。

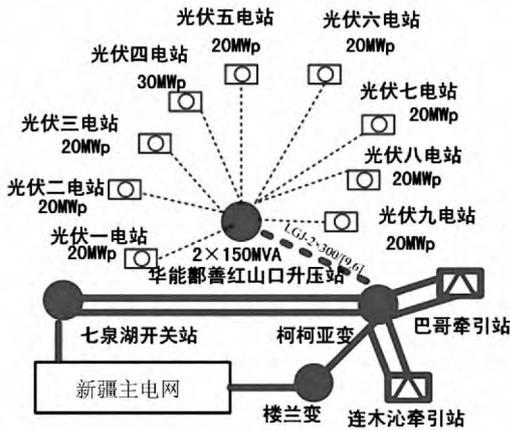


图 5 光伏电站与牵引站集中接入
220 kV 柯柯亚变电站示意图

在电力系统综合分析程序 PSASP 中搭建该地区电网模型。两座电铁牵引负荷共计 20 MW,光伏电站出力共计 170 MW 的情况下进行仿真分析。

4.1 光伏电站对电铁牵引站的影响

光伏电站受乌云、日照扰动,光伏出力的有功、无功会有波动,这样会造成系统的潮流变化,各节点电压波动。当光伏电站受到云彩、日照扰动时巴哥牵引站高压母线电压波动的仿真曲线如图 6 所示。

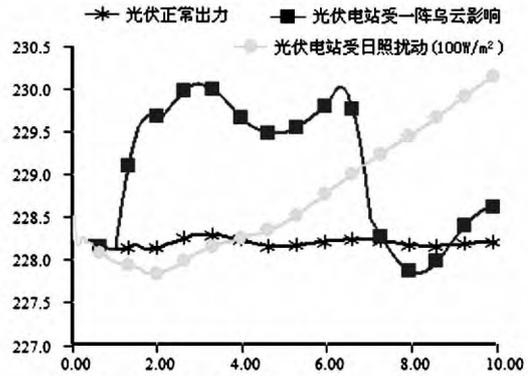


图 6 不同扰动下 220 kV 巴哥牵引站高压母线电压

由图 6 可以看出,光伏电站受不同扰动下,牵引站母线电压存在不同程度的波动,扰动幅值到 2 kV 左右。电压的波动会直接影响电力机车的运行状态,造成机车电力电子器件频繁受到冲击,缩短其使用寿命,加大电力机车注入电网的负序电流和谐波^[7]。

4.2 电铁牵引站对光伏电站的影响

电铁牵引负荷随着运行状况的不同会对系统造成不同程度的冲击,引起光伏电站的出力和汇集站电压的波动。光伏电站未受扰动而电铁负荷运行时光伏电站输出的有功功率和汇集站电压变化的仿真曲线如图 7 和图 8 所示。

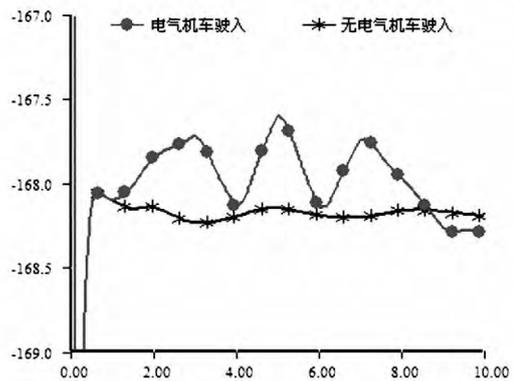


图 7 电气机车运行时光伏联络线

(红山口变电站—柯柯亚变电站)有功波动

从图 7 和图 8 中可以看出,电气机车运行时,光伏电站有功出力减少,而无功出力增加,以补偿机车的部分无功消耗,对电网可起到一定的电压调节作用。

从图 8 和图 9 中进一步可以看出,电气机车驶入,使得光伏汇集站电压下降,光伏电站自动调节无功出力,以提高汇集站母线电压。光伏电站无功出力波形与汇集站电压波形,波动曲线几乎一致,相位

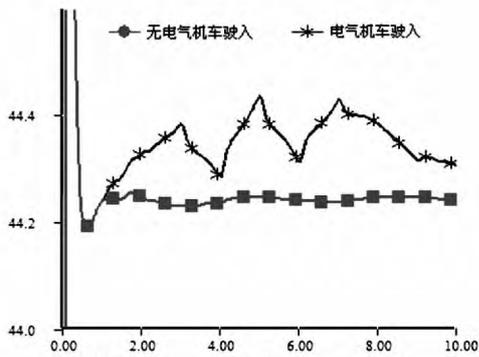


图 8 电气机车运行时光伏联络线
(红山口变电站—柯柯亚变电站)无功波动

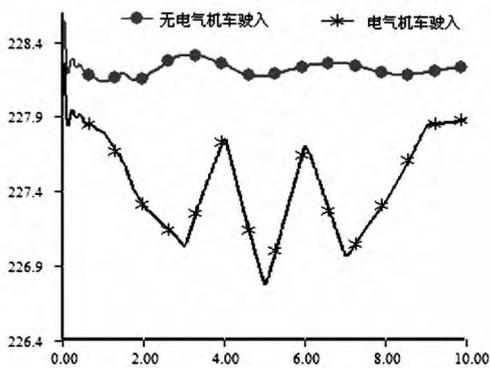


图 9 电气机车运行时光伏汇集站母线电压波动

相反。

4.3 光伏电站与电铁集中接入对电网的影响

光伏电站出力受运行、日照扰动、切机等影响,不同影响下,光伏电站的输出功率有所波动,将对系统造成一定的冲击,如果此时再叠加上电铁牵引负荷对系统的冲击,将进一步恶化地区电网的稳定水平。电气机车运行前后光伏电站受不同扰动时集中接入点电压波动仿真曲线如图 10 至图 12 所示。

由图 10 至图 12 可以看出,电铁牵引负荷未接入地区电网时由于光伏电站受各因素影响,将引起接入点电压波动;而当光伏电站与电气化铁路集中

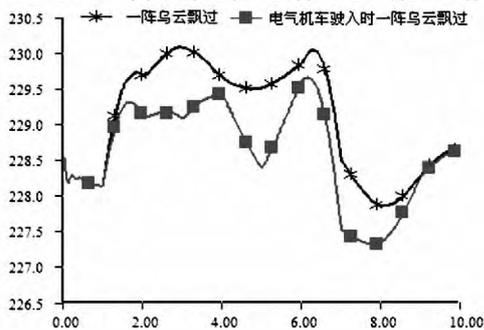


图 10 一阵乌云飘过时集中接入点母线电压波动

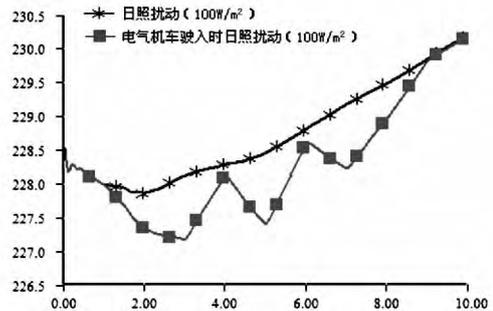


图 11 日照扰动时集中接入点母线电压波动

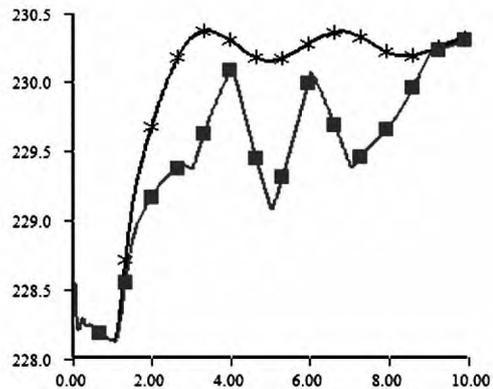


图 12 稳控动作切除 4 座光伏电站时集中
接入点母线电压波动

接入地区电网后,在电铁牵引负荷运行时光伏电站受不同因素扰动将引起集中接入点电压的大幅波动。

5 结 论

光伏电站本身就是不稳定电源,其运行特性受云彩、日照等影响较大,当电铁牵引负荷接入后,电力机车在运行过程中会造成光伏电站出力的波动,加大光伏配套电力元件故障的概率,从而加剧了对地区电网稳定性的影响。

为了减小电铁牵引负荷运行时对光伏电站的影响,一方面应在电气化铁路牵引站装设 SVC 或者 SVG 补偿滤波装置,选取阻抗匹配平衡接线的牵引变压器,采取换相接入的措施来抑制电铁负荷的谐波和负序电流;另一方面应对光伏电站 PCC 点处的谐波进行检测,如果原有的滤波装置不能有效滤除电铁牵引负荷产生的具有独特序量规律的谐波,应注意更新滤波装置。

(下转第 61 页)

闪、防雨闪措施研究[J]. 中国电力, 2005, 38(12): 24 - 28.

[2] 王锦. 直流悬式系列瓷绝缘子设计性能及应用[J]. 电瓷避雷器, 2010(1): 13 - 18.

[3] 国家电网公司. 特高压直流换流站支柱绝缘子设计[R]. 北京: 国家电网公司, 2007.

[4] 赵峰, 张福增, 杨皓麟, 等. 复合支柱绝缘子在高海拔区直流污闪与污雨闪性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(10): 1581 - 1584.

[5] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[6] 冯慈璋. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[7] 施围. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械出版社, 2006.

[8] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.

[9] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 236 - 239.

[10] 卢明, 杨庆, 阎东, 等. 复合绝缘子伞型结构对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器, 2011(1): 1 - 5.

[11] 李名加. 10 kV 合成绝缘子沿面电场分布计算及其憎

水性变化因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.

[12] 王黎明, 张楚岩, 任贵清, 等. 特高压交流复合绝缘子伞裙结构的优化设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2335 - 2339.

[13] 乐波, 马为民, 郑劲. 特高压直流场外绝缘方案的研究[J]. 电力建设, 2006, 1(1): 1 - 5.

[14] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[15] 中国南方电网公司. ± 800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[16] 中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 16927. 1 - 1997, 高电压试验技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.

作者简介:

许安(1958), 高级工程师, 从事电力系统过电压防护的研究;

何大猛(1988), 硕士研究生, 研究方向为电气设备电磁分析与电力系统过电压防护。

(收稿日期: 2013 - 10 - 24)

(上接第 21 页)

针对光伏电站出力不稳定的问题, 现在已经有了大量的研究和试验工作进行光功率预测, 目的是为了经济调度, 确保电网的安全稳定运行。但在电气化铁路接入后, 仅仅进行光功率的预测是不够的。所以在平时电网调度运行过程中, 应加强光伏电站、电网、铁路三个部门的相互协调与合作, 将光功率预测结果与电气化铁路的列车运行图结合起来, 综合考虑这两方面因素对电网进行调度, 从而确保电网的安全稳定运行。

参考文献

[1] 张晓薇, 李振国. 电气化铁路接入电力系统 220 kV 和 110 kV 供电电压等级的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 13 - 16.

[2] 王厂贵. 并网光伏发电系统综述(上)[J]. 太阳能, 2008(2): 14 - 17.

[3] 姚金雄, 张涛. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术, 2008, 32

(9): 61 - 65.

[4] 方廷, 韩郁, 张岚. 一种多逆变器太阳能光伏并网发电系统的组群控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 57 - 60.

[5] 熊丽霞. 浙赣电气化铁路牵引负荷特性分析[J]. 江西电力, 2009, 33(2): 27 - 29.

[6] 韦钢, 吴伟力. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36 - 40.

[7] 韩柳, 谈顺涛. 电气化铁路对电网的影响及对策[J]. 江苏电机工程, 2005(3): 8 - 11.

[8] 周小涵. 电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(4): 41 - 43.

[9] 卢志海, 厉吉文, 周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器, 2006, 32(11): 33 - 36.

[10] 粟时平, 刘贵英. 静止无功功率补偿技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 69 - 93.

作者简介:

胡仁祥(1987), 硕士, 从事电网调度运行。

(收稿日期: 2013 - 10 - 24)