

电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响分析

张新伟¹ 李波²

(1. 国网乌鲁木齐供电公司 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 国网荆州供电公司 湖北 荆州 434500)

摘要: 随着兰新铁路电气化改造工程建设,风资源丰富新疆出现了电气化铁路牵引站与风电场集中接入电网的情况。综合考虑电铁牵引负荷的特点和风电场的功率特性,通过理论推导从谐波和负序的角度分析了电铁牵引负荷对风电场的影响,并结合新疆电网实际,在电力系统仿真分析软件 DigSILENT PowerFactory 中建立模型进行仿真分析,深入研究了电铁牵引负荷在运行过程中对风电场运行特性的影响,并对解决措施进行了探讨,具有一定的实际意义。

关键词: 电铁牵引负荷; 谐波; 风电场; 瞬时功率

Abstract: With the construction of electrification reconstruction project of Lan - Xin Railway , the central integration of electrified railway traction substations and wind farms has appeared in Xinjiang. The characteristics of electrified railway traction load and the power features of wind farm are taken into account , and through the theoretical analysis , the influences of electrified railway traction load on operational characteristics of wind farms are analyzed as viewed from the harmonics and negative sequence. Combined with the actual situation of Xinjiang power grid , the equivalent model is established on the basis of power system simulation and analysis software DigSILENT PowerFactory. After the simulation and analysis , the impacts of electrified railway traction load on the operational characteristics of wind farms are studied and the solving measures are discussed , which is of practical significance.

Key words: electrified railway traction load; harmonic; wind farm; instantaneous power

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)01 - 0071 - 05

0 引言

随着越来越多的大型风电场并网运行,在新疆部分地区的风电场周围伴随有铁路的穿越。电气化铁路在运输效率、节能环保等方面具有显著优势,已成为现阶段铁路建设发展的主要方向。随着电气化改造工程建设,大量的电气化铁路牵引站与风电场集中接入电网。电铁牵引负荷具有功率波动、谐波和负序特性,对电网影响较大。而风电场的出力因风的不稳定性而波动较大,风电机组单机容量相对较小,风电场中有大量风电机组并列运行。现有的文献主要是针对电铁牵引负荷对电网的影响和风电场的运行特性分别进行研究,针对新疆电网出现的电铁牵引负荷与风电场集中接入地区电网的情况,对电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响进行分析研究具有重要的实际意义。

1 电铁牵引负荷的特点

特殊的驱动类型和供电方式造成了电铁牵引负

荷具有功率因数低、波动范围大、谐波含量丰富、负序电流大等特点。

(1) 随机波动性

与电力系统中的常规负荷相比,电铁牵引负荷的特殊性表现在它的快速移动和频繁波动,机车类型、运行状态、线路条件、载重量等一系列因素都会影响到电力机车的电流特性,牵引电流从零到满载或者从满载到零的大范围变化往往发生在几秒钟内,并且贯穿于整个运行过程。

(2) 谐波特性

目前中国大多使用交直型电力机车,牵引电机所使用的直流电是基于桥式变流器整流得到的,整个电流变换过程是一个非线性过程,所以牵引电流中含有大量的谐波分量,其中奇次谐波是特征分量,偶次谐波是非特征分量。特征谐波分量以3、5、7次谐波为主,其中3次谐波最大。电铁牵引负荷产生的谐波属于相位分布广泛且幅值波动大的三相不平衡谐波。

(3) 负序特性

同一个电铁牵引站的不同供电臂所接带负荷的

单相性和较小相关性决定了地铁牵引负荷的单相独立性,所以当地铁牵引负荷接入三相基本平衡的电力系统时会在电网中造成一定的负序分量,引起三相电压和电流的不平衡。

2 地铁牵引负荷的谐波对风电场的影响

2.1 地铁牵引负荷的谐波特性分析

地铁牵引负荷是电网中典型的不对称谐波源,在其运行过程中产生的不平衡谐波电流表现的特殊的序量规律。

在分析地铁牵引负荷产生的不平衡谐波时,基波电流的幅值分别用 \bar{i}_{A1} 、 \bar{i}_{B1} 、 \bar{i}_{C1} 表示 h 次谐波电流的幅值分别用 \bar{i}_{Ah} 、 \bar{i}_{Bh} 、 \bar{i}_{Ch} 表示, B、C 相谐波电流与 A 相谐波电流的幅值差分别用 $\Delta\bar{i}_{Bh}$ 、 $\Delta\bar{i}_{Ch}$ 表示,基波电流的初始相角分别用 φ_{A1} 、 φ_{B1} 、 φ_{C1} 表示, h 次谐波电流相对于基波电流的初始相角分别用 φ_{Ah} 、 φ_{Bh} 、 φ_{Ch} 表示。三相不平衡时 B、C 相谐波电流相对于三相平衡时 B、C 相谐波电流的相角差分别用 $\Delta\varphi_{Bh}$ 、 $\Delta\varphi_{Ch}$ 表示,时域下基波电流可以表示为式(1)。

$$\begin{cases} i_{A1}(t) = \bar{i}_{A1} \sin(\omega t + \varphi_{A1}) \\ i_{B1}(t) = (\bar{i}_{A1} + \Delta\bar{i}_{B1}) \sin(\omega t + \varphi_{A1} - 120^\circ + \Delta\varphi_{B1}) \\ i_{C1}(t) = (\bar{i}_{A1} + \Delta\bar{i}_{C1}) \sin(\omega t + \varphi_{A1} - 240^\circ + \Delta\varphi_{C1}) \end{cases} \quad (1)$$

那么,时域下 h 次谐波电流如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_{Ah}(t) = \bar{i}_{Ah} \sin[h \cdot (\omega t + \varphi_{A1}) + \varphi_{Ah}] \\ i_{Bh}(t) = (\bar{i}_{Ah} + \Delta\bar{i}_{Bh}) \sin[h(\omega t + \varphi_{A1} - 120^\circ + \Delta\varphi_{B1}) + \varphi_{Ah} + \Delta\varphi_{Bh}] \\ i_{Ch}(t) = (\bar{i}_{Ah} + \Delta\bar{i}_{Ch}) \sin[h(\omega t + \varphi_{A1} - 240^\circ + \Delta\varphi_{C1}) + \varphi_{Ah} + \Delta\varphi_{Ch}] \end{cases} \quad (2)$$

各次谐波电流通过对称分量法可以分解为正序、负序、零序分量,如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{+h} \\ \bar{i}_{-h} \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ah} \\ \bar{i}_{Bh} \\ \bar{i}_{Ch} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $a = e^{j120^\circ}$ 。

三相电流平衡时, $\Delta\bar{i}_{Bh} = \Delta\bar{i}_{Ch} = 0$, $\Delta\varphi_{Bh} = \Delta\varphi_{Ch} = 0$,通过式(2)、式(3)可以得出:当 $h = 3k +$

1,如 $h = 1, 4, 7, \dots$ 时,电流只有正序分量;当 $h = 3k - 1$,如 $h = 2, 5, 8, \dots$ 时,电流只有负序分量;当 $h = 3k$,如 $h = 3, 6, 9, \dots$ 时,电流只有零序分量。

三相电流不平衡时, $\Delta\bar{i}_{Bh}$ 、 $\Delta\bar{i}_{Ch} \neq 0$ 或 $\Delta\varphi_{Bh}$ 、 $\Delta\varphi_{Ch} \neq 0$,或者两者都满足 $\Delta\varphi_{B1}$ 、 $\Delta\varphi_{C1}$ 的值对谐波电流的序分量影响较大。由式(2)、式(3)计算得出:当 $\Delta\varphi_{B1} = \Delta\varphi_{C1} = \pm 5^\circ$ 时,3次谐波电流中正、负序分量分别占到了16%和14%,6次谐波电流中正、负序分量分别占到了33%和22%;当 $\Delta\varphi_{B1} = \Delta\varphi_{C1} = \pm 20^\circ$ 时,6次谐波电流中只含正序分量。

通过以上分析,地铁牵引负荷在运行过程中注入电网的 $3h$ 次谐波电流会因基波电流相角偏差而含有正序和负序分量,甚至只含正序或者负序分量。因此,基波电流不对称时 $3h$ 次谐波电流将不受 Y/Δ 接线变压器的阻碍而在电网中任意流动。

2.2 地铁谐波对风电场的影响

风力发电不同于水电、火电等常规电源的显著特点是单机容量较小,为了充分利用能量密度较低的风能,风电场中通常有大量风电机组并列运行。

当电气化铁路牵引站与风电场集中接入地区电网时,地铁牵引负荷注入电网的三相不平衡谐波电流将会注入风电场,对变压器、电流变换装置、补偿装置、风电机组等电力设备造成影响。部分风电场投运的是恒速恒频风电机组,在风机出口处装设有补偿无功功率的电容器组,并且风机和补偿电容是同退同投的。风电场中投运风电机组(电容器组)的数量会因风速过大(超过切除风速)或者故障检修等不确定因素而随机变化,因此,风电场的等值阻抗会在一个较大的范围内变动,PCC点处的谐振点分布范围较大,较容易引起谐波放大和谐振。

注入风电场的谐波电流会增加风电机组和变压器的损耗,加速绝缘老化,引起附加振动。对于安装恒速恒频风电机组的风电场,谐波电流的注入会增加补偿电容的介质损耗,降低其使用寿命。如果风电场内部发生了谐波电流放大或者谐振,风机出口处的补偿电容器组可能会因为过电流而跳闸甚至损坏,那么对应的风电机组也会退出运行,这样就会造成风电场输出有功功率的变化,加剧风电场出力的不确定性。

3 地铁牵引负荷的负序对风电场的影响

3.1 不平衡电压下风电机组的功率特性

在分析三相电压不平衡时风电机组输出的有功功率时,用 u_A, u_B, u_C 表示风机出口处三相电压瞬时值,用 i_A, i_B, i_C 表示风机出口处三相电流瞬时值,风电机组输出的有功功率瞬时值 P_s 可以表示为

$$P_s = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \quad (4)$$

风电机组出口处的箱式变压器通常为 Δ/Y 接线,所以不考虑零序电流分量,利用派克变换将三相静止坐标系下的 A、B、C 三相分量变换到同步旋转坐标系下的 $d, q, 0$ 三个分量,式(4)可以写出如下形式。

$$P_s = u_d i_d + u_q i_q \quad (5)$$

利用对称分量法将三相不平衡时电压和电流矢量分解为正序和负序分量,用 ω 表示同步电角速度, φ_0 表示正序初始旋转角和负序初始旋转角的差值,那么同步旋转坐标系下电压电流分量如式(6)所示。

$$\begin{cases} u_d = u_d^+ + u_d^- \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad + u_q^- \sin(2\omega t + \varphi_0) \\ u_q = u_q^+ + u_q^- \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad - u_d^- \sin(2\omega t + \varphi_0) \\ i_d = i_d^+ + i_d^- \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad + i_q^- \sin(2\omega t + \varphi_0) \\ i_q = i_q^+ + i_q^- \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad - i_d^- \sin(2\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad (6)$$

瞬时功率如式(7)所示。

$$\begin{cases} P_s = P_0 + P_{C2} \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad + P_{S2} \sin(2\omega t + \varphi_0) \\ P_0 = u_d^+ i_d^+ + u_q^+ i_q^+ + u_d^- i_d^- + u_q^- i_q^- \\ P_{C2} = u_d^- i_d^+ + u_q^- i_q^+ + u_d^+ i_d^- + u_q^+ i_q^- \\ P_{S2} = u_q^- i_d^+ - u_d^- i_q^+ - u_q^+ i_d^- = u_d^+ i_q^- \end{cases} \quad (7)$$

令 $\frac{P_{C2}}{\sqrt{P_{C2}^2 + P_{S2}^2}} = \sin\theta$, $\frac{P_{S2}}{\sqrt{P_{C2}^2 + P_{S2}^2}} = \cos\theta$, 那么风

电机组的瞬时功率可以表示为

$$P_s = P_0 + \sqrt{P_{C2}^2 + P_{S2}^2} \sin(2\omega t + \varphi_0 + \theta) \quad (8)$$

由式(8)可以看出:不平衡电压下风电机组输出的有功功率包括恒定功率分量 P_0 和额定频率两倍的波动功率分量 $\sqrt{P_{C2}^2 + P_{S2}^2}$ 。通过对同步旋转坐标系中风电机组的数学模型的推导和分析可以得出风电机组的无功功率也包含二倍频的波动分量。

3.2 负序对风电场的影响

电铁牵引负荷具有单相独立性,其注入电网的负序电流大小与两供电臂的电流幅值及两供电臂功率因数角之差相关。负序电流注入风电场后将造成箱式变压器和风电场升压站主变压器的局部过热,损坏绝缘,导致风电机组的附加发热和振动,继电保护装置误动作,使风电机组输出的有功功率具有 100 Hz 的波动分量。由于电铁牵引负荷的取流特性多变,风电场的输出功率也是随机变化的,这两种不确定因素会造成风电场输出的瞬时功率波动幅值频繁变化,这势必会加剧电网的电压波动和闪变等电能质量问题。

4 仿真分析

4.1 仿真模型及参数

以兰新铁路红柳河至阿拉山口段电气化改造工程建设中,MGT 牵引站、DBS 牵引站与 ALSK 风电场、WLDBS 风电场通过 220 kV ALSK 变电站集中接入新疆电网为例,地区电网接线如图 1 所示。

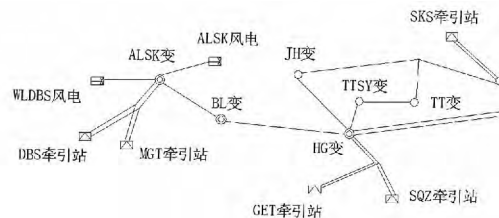


图 1 地区电网接线图

电气化铁路牵引站和风电场均是 110 kV 接入。ALSJK 风电场和 WLDBS 风电场各装设了 66 台单机容量 750 kW 的恒速恒频风电机组,两个风电场的装机容量均为 49.5 MW,升压站的主变压器均为 $Y_n - d11$ 接线形式。MGT 牵引站和 DBS 牵引站的供电区段均运行的是韶山 7 型电力机车。在进行仿真分析时以各供电臂电力机车全开考虑。在电力系统仿真分析软件 DIgSILENT PowerFactory 中搭建仿真模型,基于不平衡潮流进行谐波潮流计算和瞬时功率时域仿真,分析了电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响。

4.2 谐波影响仿真分析

1) 风电机组投运数量不变,谐波相角变化

当两个风电场均满发,即 66 台风电机组全部投运,电铁牵引负荷注入电网的 3 次谐波电流相角与基波电流相角差 $(\varphi_{A3} - \varphi_{A1}, \varphi_{B3} - \varphi_{B1}, \varphi_{C3} - \varphi_{C1})$

变化时,风电场汇流母线处各次谐波电流值如图2、图3、图4所示。

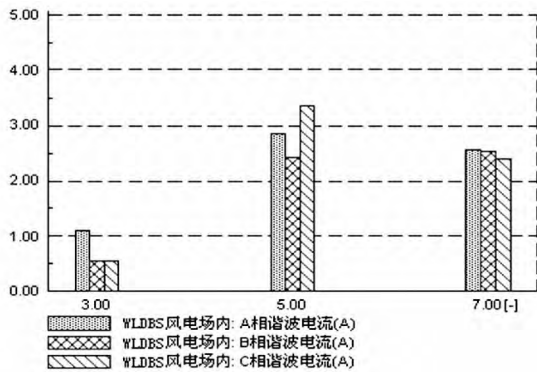


图2 $\Delta\varphi_{A3} = 5^\circ \Delta\varphi_{B3} = 5^\circ \Delta\varphi_{C3} = 5^\circ$ 时
风电场的谐波电流

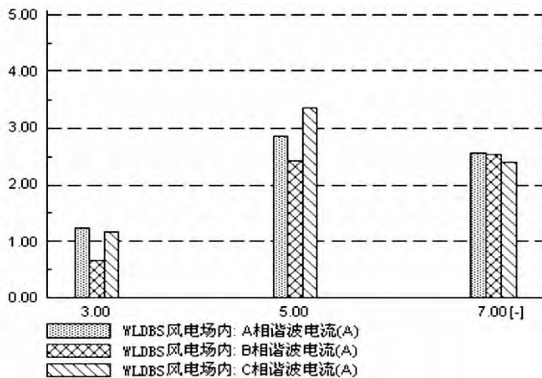


图3 $\Delta\varphi_{A3} = 10^\circ \Delta\varphi_{B3} = 20^\circ \Delta\varphi_{C3} = 30^\circ$ 时
风电场的谐波电流

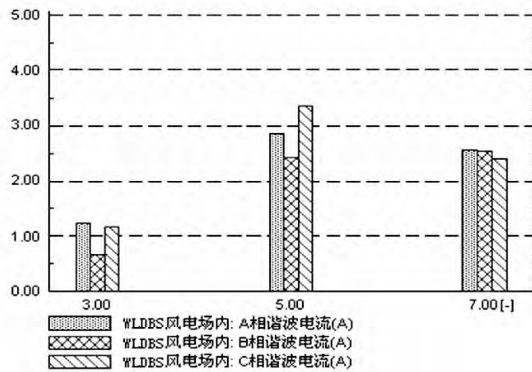


图4 $\Delta\varphi_{A3} = 10^\circ \Delta\varphi_{B3} = 30^\circ \Delta\varphi_{C3} = 50^\circ$ 时
风电场的谐波电流

通过对图2、图3、图4的对比分析可得:风电场汇流母线处3次谐波电流的大小会随着3次谐波相角与基波相角差值的变化而变化,不受风电场升压站主变压器接线形式的影响。

2) 谐波电流不变,风电机组投运数量变化

当电铁牵引负荷注入电网的谐波电流幅值和相位不变,两个风电场各投运66台、33台、15台风电机组时,风电场汇流母线处的各次谐波电流值如图

5、图6、图7所示。

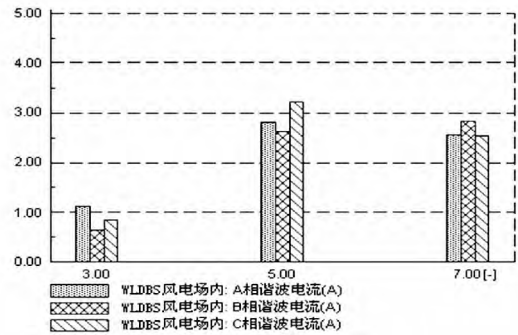


图5 风电场投运66台机组时谐波电流

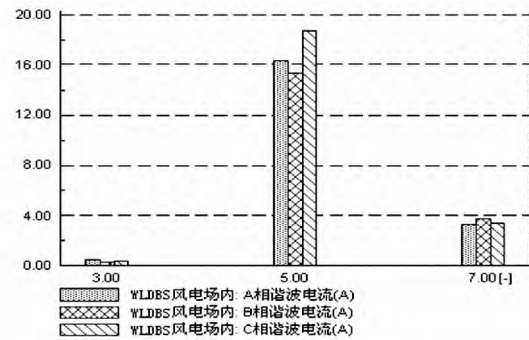


图6 风电场投运33台机组时谐波电流

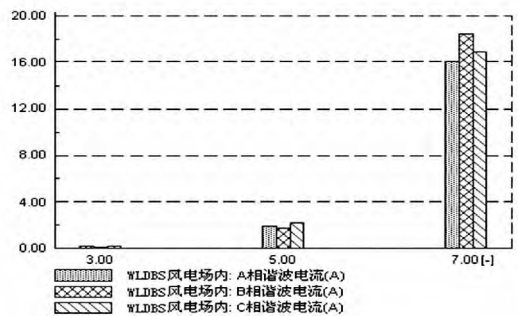


图7 风电场投运15台机组时谐波电流

通过对图5、图6、图7的对比分析可得:当风电场满发时,风电场汇流母线处的各次谐波电流值相对较小;当风电场各投运33台风电机组时,两风电场内5次谐波被放大;当风电场各投运15台风电机组时,WLDBS风电场内7次谐波被放大。

研究表明:电铁牵引负荷在运行过程中产生的三相不平衡3h次谐波的相位偏差不同时,由于谐波电流中序分量的不同而使得注入风电场中的3h次谐波含量也不同;随着风电场中投运恒速恒频率风电机组数量的变化有可能引起风电场内部的谐波放大或者谐振。

4.3 负序影响仿真分析

当BYH风电场有功出力33.75 MW,CH风电场有功出力为49.5 MW,电铁牵引站接带与电力机

车等功率的三相平衡负荷时两个风电场的输出功率瞬时值如图 8 所示, 电铁牵引站接带的电力机车在行驶和启动过程中两个风电场的输出功率瞬时值如图 9、图 10 所示。

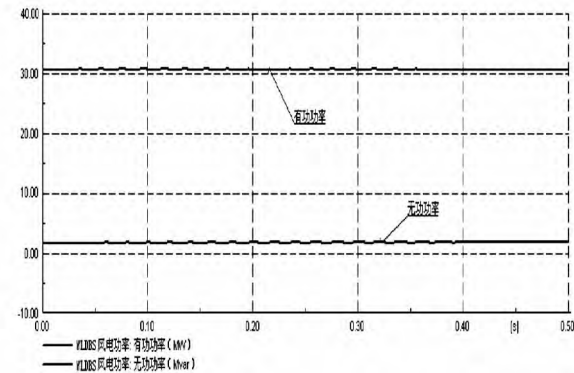


图 8 三相平衡负荷接入后风电场的输出功率

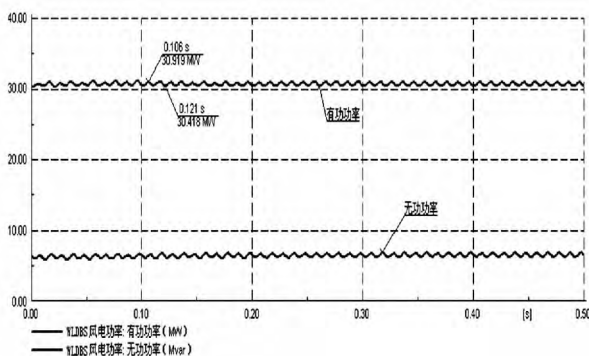


图 9 电铁牵引负荷行驶过程中风电场的输出功率

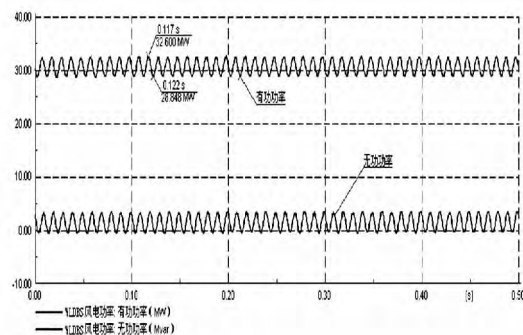


图 10 电铁牵引负荷启动时风电场的输出功率

通过对图 8、图 9 的对比分析可得: 当电铁牵引负荷与风电场集中接入地区电网后, 负序电流引起的三相电压不平衡将会造成风电场的瞬时有功功率和瞬时无功功率以 100 Hz 的频率波动。通过对图 9、图 10 的对比分析可得: 牵引功率越大时风电场输出功率的波动幅值就越大, 风电场的输出功率越大时功率波动也越大。

研究表明: 电铁牵引负荷在运行过程中引起的电压不平衡将造成风电机组的输出功率包含频率为 100 Hz 的波动分量, 波动幅值与电铁牵引负荷

的取流及风电场的输出功率呈正相关的关系。

5 结 论

针对电气化铁路牵引站与风电场集中接入新疆电网的情况, 通过理论推导和仿真分析相结合的方法, 深入研究了电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响, 结果表明电铁牵引负荷在运行过程中产生的谐波、负序电流等将对风电场的输出功率产生较大影响。

针对电铁牵引负荷的谐波对风电场的影响, 一方面, 可以采用谐波含量相对较少的交直交型电力机车; 另一方面, 对于规划待建的风电场, 最好安装单机容量较大并且可以实现有功功率和无功功率解耦控制的双馈异步风电机组或者直驱永磁同步风电机组, 减小风电场中谐波放大或者谐振的概率。针对电铁牵引负荷负序对风电场的影响, 一方面可以综合考虑经济、技术等因素在集中接入点装设具有分相控制能力的 SVC 动态无功补偿装置; 另一方面, 可以采用抗扰动能力相对较强的风电机组或者选择其他的接入点, 尽量避免电铁牵引站和风电场集中接入电网。

参考文献

- [1] 吴帆. 基于实测数据的牵引变电所运行特性仿真及评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
- [2] 顾文. 电气化铁路对徐州电网的影响[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [3] 贺建闽, 黄治清. 电力用户谐波测量与评估[J]. 供用电, 2002, 13(6): 134-140.
- [4] 聂静静, 吴文宣. 高速电气化铁路谐波的仿真计算与分析[J]. 福建电力与电工, 2008, 28(1): 8-11.
- [5] 杨晓萍, 段先锋. 直驱永磁同步风电机组不对称故障穿越的研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2): 7-12.
- [6] 胡家兵, 贺益康. 不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 47-56.
- [7] 陈宁, 朱凌志. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 102-108.

作者简介:

张新伟(1986), 主要从事电网稳定分析和电网电价方面的研究工作;

李波(1973), 主要从事电网调度控制工作以及电网输配电价方面的研究工作。(收稿日期: 2013-08-12)