

电铁谐波对风电场的影响

张新伟¹, 晁 勤¹, 康建东², 常喜强³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;

3. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:结合电铁牵引负荷的谐波特性与包含大量异步风电机组的风电场中升压站低压侧谐振点频带较宽的特点, 针对新疆部分地区电网在同一点同时接入电气化铁路和风电场的情况, 从理论上分析了电铁谐波对风电场运行特性的影响, 并在仿真软件中搭建了新疆某地区电网模型, 对风电场投运风机数量不同时电铁牵引负荷在不同工况下可能引发风电场升压站低压母线处谐振现象进行了仿真分析和评估, 提出了减小电铁谐波对风电场影响的建议和措施, 具有一定的实际意义。

关键词:电气化铁路; 不平衡谐波; 异步风电机组; 谐振

Abstract: Combining the harmonic characteristics of electrified railway traction load with the characteristics that low-pressure side of booster plant in wind farm which contains a large amount of asynchronous wind turbine generators holds wide-frequency channel of resonance point and aiming at the phenomenon that electrified railway and wind farm connect with power grid at the same point and at the same time in some area of Xinjiang the influence of electrified railway harmonic on the operation features of wind farm is analyzed theoretically. The grid model for a area in Xinjiang is established in the simulation software the resonance phenomena at LV busbar of booster plant are analyzed and evaluated which may be caused under different operating condition when the number of running wind generators are variable. And the suggestions and measures are proposed to reduce the influence of electrified railway harmonic on wind farm, which has some practical significance.

Key words: electrified railway; unbalance harmonic; asynchronous wind turbine generator; resonance

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0008-05

0 引 言

随着越来越多的大型风电场并网运行, 在部分地区的风电场周围伴随有铁路的穿越。电力牵引技术大大促进了铁路的发展, 电气化铁路已成为现阶段铁路建设发展的主要方向。现在的研究者主要是对电铁牵引负荷的谐波特性和风电场的并网运行分别进行研究。文献 [1-3] 详细分析了电铁谐波的特点及其在高压电网中的渗透特性以及对常规电网电能质量及电力设备的影响, 但并没有涉及对含有风电场的地区电网中风电系统的影响; 文献 [4-6] 对风电场的运行特性及并网可靠性进行了研究, 但并未考虑电铁谐波对风电场的影响。电气化铁路的供电可靠性要求电铁牵引站需接入高压电网, 而其穿越的风区的风电场也根据电网情况接入该地区的高压电网, 这样就会在同一地点既接入了风电场, 又接入了电气化铁

路牵引站。在风资源丰富新疆有大量的风电场投运, 伴随着兰新二线电气化铁路建设, 部分地区出现了电气化铁路与风电场集中接入电网的情况。与电力系统中其他谐波源相比, 电铁负荷具有不同的谐波特性。在风电场与电铁牵引负荷集中接入的地区电网, 电铁负荷在运行过程中产生的谐波注入风电场将对风电场的运行特性造成较大影响, 电铁谐波对风电场影响的研究具有紧迫性和一定的实际意义。

1 不平衡谐波电流的序量分析

用 $\bar{i}_{A V}$ 、 $\bar{i}_{B V}$ 、 $\bar{i}_{C V}$ 分别表示 V 次谐波电流的幅值, $\Delta \bar{i}_{B V}$ 、 $\Delta \bar{i}_{C V}$ 分别表示 V 次谐波的 B、C 相电流与 A 相电流的幅值偏差, $\varphi_{A 1}$ 、 $\varphi_{B 1}$ 、 $\varphi_{C 1}$ 分别表示基波的初始相角, $\varphi_{A V}$ 、 $\varphi_{B V}$ 、 $\varphi_{C V}$ 分别表示 V 次谐波相对于基波的初始相角, $\Delta \varphi_{B V}$ 、 $\Delta \varphi_{C V}$ 分别表示 V 次谐波的 B、C 相电流相对于平衡状态下 B、C 相电流的相角偏

基金项目:新疆教育厅重点项目 (XJEDU2008J62)

差,基波、谐波电流的相角如图 1 所示。

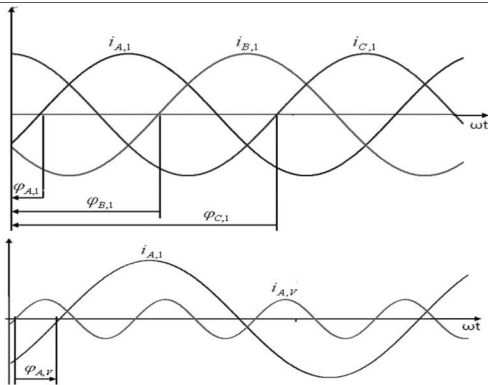


图 1 基波、谐波电流的相角

基波电流在时域表达式如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \dot{i}_{A,1}(t) = \dot{i}_{A,1} \sin(\omega t + \varphi_{A,1}) \\ \dot{i}_{B,1}(t) = \dot{i}_{B,1} \sin(\omega t + \varphi_{B,1}) \\ \dot{i}_{C,1}(t) = \dot{i}_{C,1} \sin(\omega t + \varphi_{C,1}) \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 可以写成式 (2) 的形式。

$$\begin{cases} \dot{i}_{A,1}(t) = \dot{i}_{A,1} \sin(\omega t + \varphi_{A,1}) \\ \dot{i}_{B,1}(t) = (\dot{i}_{A,1} + \Delta \dot{i}_{B,1}) \sin(\omega t + \varphi_{A,1} - 120^\circ + \Delta \varphi_{B,1}) \\ \dot{i}_{C,1}(t) = (\dot{i}_{A,1} + \Delta \dot{i}_{C,1}) \sin(\omega t + \varphi_{A,1} - 240^\circ + \Delta \varphi_{C,1}) \end{cases} \quad (2)$$

V 次谐波的时域表达式如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} \dot{i}_{A,V}(t) = \dot{i}_{A,V} \sin(V \cdot (\omega t + \varphi_{A,1}) + \varphi_{A,V}) \\ \dot{i}_{B,V}(t) = (\dot{i}_{A,V} + \Delta \dot{i}_{B,V}) \sin(V(\omega t + \varphi_{A,1} - 120^\circ + \Delta \varphi_{B,1}) + \varphi_{A,V} + \Delta \varphi_{B,V}) \\ \dot{i}_{C,V}(t) = (\dot{i}_{A,V} + \Delta \dot{i}_{C,V}) \sin(V(\omega t + \varphi_{A,1} - 240^\circ + \Delta \varphi_{C,1}) + \varphi_{A,V} + \Delta \varphi_{C,V}) \end{cases} \quad (3)$$

利用对称分量法,各相电流可以分解为正序、负序、零序分量,计算公式如式 (4) 所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{+,V} \\ \dot{i}_{-,V} \\ \dot{i}_{0,V} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_{A,V} \\ \dot{i}_{B,V} \\ \dot{i}_{C,V} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $[T] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, $a = e^{j120^\circ}$ 。

当三相电流平衡,即 $\Delta \dot{i}_{B,V} = \Delta \dot{i}_{C,V} = 0, \Delta \varphi_{B,V} = \Delta \varphi_{C,V} = 0$ 时,由式 (3)、式 (4) 可得:当 $V=1, 4, 7, \dots$

时,电流只有正序分量;当 $V=2, 5, 8, \dots$ 时,电流只有负序分量;当 $V=3, 6, 9, \dots$ 时,电流只有零序分量。

三相电流不平衡,即 $\Delta \varphi_{B,V}, \Delta \varphi_{C,V} \neq 0$ 时,基波电流的相位差将对谐波电流的序分量产生较大影响。通过式 (3)、式 (4) 计算可得:当基波电流相角偏差 $\pm 5^\circ$ 时,3 次谐波中含有 16% 的正序分量和 14% 的负序分量,6 次谐波中含有 33% 的正序分量和 24% 的负序分量;当基波电流相角偏差 $\pm 20^\circ$ 时,6 次谐波的相角差为 120° ,此时的谐波电流是对称的,只含有正序分量。

由以上分析可知,电网接带不对称负荷时,3K 次谐波会含有正序分量和负序分量,其含有率随着基波电流相角差的变化而变化^[7]。当基波电流相角偏差到一定数值时,3K 次谐波中只含有正序分量或者负序分量,此时 3K 次谐波不受电网中变压器接线形式的影响,可在电网中任意流动^[8]。

2 电铁牵引负荷的谐波特点

2.1 电铁谐波的特性分析

电气化铁路是电力系统中典型的三相不对称谐波源,它与其他非线性负荷相比具有不同的负荷特性。电铁负荷产生的谐波具有的一些明显特点^[9-10]如下。

(1) 随机波动性:谐波电流随基波负荷剧烈波动,范围巨大。

(2) 相位分布广泛:谐波向量在复平面内四个象限上出现。

(3) 高压渗透性:电气化铁道牵引供电系统是为数不多的高压用户,其产生的电能污染可以通过高压系统向全网渗透,不受变压器接线方式的阻碍。

(4) 稳态奇次性:大量运行的交一直流型电力机车属于单相整流非线性负荷,在稳态运行时只产生奇次谐波。

(5) 暂态偶次性:电力机车在启动与过分区空载投入时会产生远高于额定电流的励磁涌流。励磁涌流不仅含有奇次谐波,还含有各偶次谐波,其中二次谐波含量最大。

电铁负荷产生的奇次谐波是其特征分量,偶次谐波畸变量相对较小,是非特征分量。谐波电流中以 3、5、7 次谐波为主,尤以 3 次谐波电流最大,严重时可达额定电流的 20% 以上。

2.2 电铁谐波的序量规律

电铁牵引负荷运行过程中稳态谐波的序量规律随着牵引变压器接线形式的不同而不同。对于 SCOTT 接线牵引变压器和阻抗匹配平衡牵引变压器,只要两个供电臂都有负荷,则这两种牵引变电所注入系统的谐波电流的序量规律为^[11]

4K + 1 次谐波 —— 主要是正序分量;

4K - 1 次谐波 —— 主要是负序分量;

这一规律也适用于 3 倍数的奇次谐波。

对于 YNd11 接线和 V/V 接线的牵引变压器,谐波电流的序量规律为

6K + 1 次谐波 —— 主要是正序分量;

6K - 1 次谐波 —— 主要是负序分量;

6K ± 3 次谐波 —— 正序分量和负序分量大致相等。

不论采用哪种接线形式的牵引变压器,电铁负荷产生的三相不平衡 3K 次谐波主要是正序分量和负序分量,不论变压器中性点是否接地或变压器是否有 Δ 绕组,3K 次谐波不受任何阻拦,在电网中随处流动。

3 电铁谐波对风电场的影响

与电力系统中水电、火电等常规电源相比,风电场的一个显著特点是大量风力发电机组并列运行。风能的能量密度较低,风电机组的单机容量相对较小,为了更加充分地利用风能,获得较大的发电容量,风电场由大量风电机组并列运行。经过对新疆部分已投运的风电场进行现场调研,异步风电机组在运行过程中向电网发出有功的同时还从系统中吸收大量的无功功率。为了维持风电场 PCC 点处的电压稳定,平衡系统无功功率,通常在风机出口处装设补偿电容器组。风电机组和补偿电容器组的投入和退出运行是同步的。由于风能的不确定性,风电机组(补偿电容器组)投入数量也是随机变化的,即风电场的等效阻抗变化范围较大,所以风电场升压站低压侧母线的谐振频率会随着风机投运数量的变化而变化。

目前国内普遍采用的是韶山系列电力机车,由于采用了大功率整流装置,一系列的电力机车在运行过程中会产生大量的三相不平衡谐波,三相不平衡谐波不受风电场内变压器接线形式的限制,很容易注入风电场,对风电场中的变压器、风电机组及补偿电容

器组造成影响,如图 2 所示。

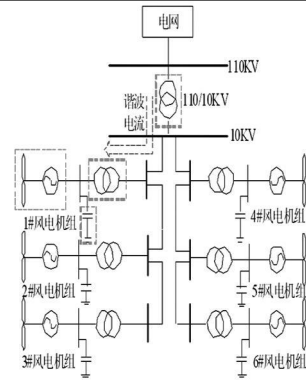


图 2 风电场结构示意图

(1)电铁谐波对风电场中变压器的影响:对于风电场中风机出口处的箱式变压器和风电场升压站主变压器,电铁谐波的注入会增加变压器的铜耗和铁耗,并随频率的增大而增大。谐波损耗产生的局部过热会降低变压器的绝缘寿命。当附加损耗达到一定值时,需要降低出力运行。若变压器绕组的电抗和电容器组发生串联谐振时,将产生谐波过电压,使局部放电增加,加速绝缘老化。严重时还会发生绝缘击穿事故^[12]。

(2)电铁谐波对风电机组的影响:电铁谐波注入风电场会造成风电机组的附加损耗、附加振动、噪声和谐波过电压^[13]。当风电机组中谐波电流的频率接近发电机零部件的固有振动频率时,可能引起风电机组的强烈机械振动。

(3)电铁谐波对风电场中补偿电容器组的影响:谐波会增加补偿电容器组的介质损耗,使温升增高,从而降低其寿命。电容器组有可能造成谐振或者谐波电流放大,造成电容器组的过电流跳闸或损坏^[14]。与其对应的风机将退出运行,造成风电场的出力不确定性增大。电气化铁路与风电场集中接入地区电网后,风电场的运行特性就受到风速和电铁牵引负荷的双重影响,加剧了风电出力的波动性和随机性。

4 仿真分析

新疆某地区电网如图 3 所示,新能源风电场、水利厅风电场、盐湖电铁牵引站均通过 110 kV 输电线路集中接入 220 kV 盐湖变电站。新能源风电场总装机 45 MW,共 30 台额定容量 1.5 MW 的双馈式风电机组;水利厅风电场总装机 33 MW,共 44 台额定容量 750 kW 定速异步风电机组。两风电场的升压站

主变压器均采用 YNd11 接线。盐湖牵引站采用 V/V 接线的牵引变压器,其供电的铁路段运行的是韶山 4 型电力机车。该电力机车采用相控调压方式,最大功率 6.4 MW。仿真时电铁牵引负荷的各次谐波电流含有率取自电铁相关试验得到的典型数据。

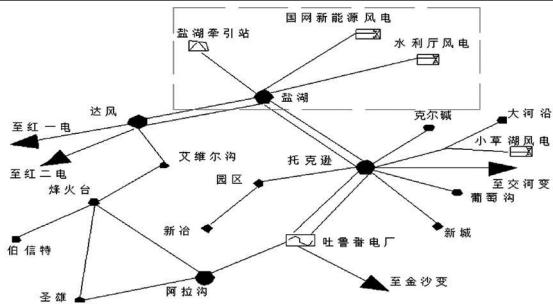


图 3 地区电网示意图

在电力系统仿真计算软件 DlgSILENT 中搭建该地区电网模型,分别对盐湖牵引站 a 供电臂接带一台满载的电力机车, b 供电臂空载,电力机车在稳态运行时和闭合主断路器及电力机车经过分区停时的暂态过程中产生的谐波对风电场运行特性的影响进行仿真分析。

4.1 电铁稳态谐波引起风电场内部谐振仿真

电铁牵引负荷在稳态运行过程中主要产生奇次三相不平衡谐波。仿真分析时对水利厅风电场升压站低压母线处进行 22 次频率扫描,每次扫描时比前一次多投运两台风电机组(补偿电容器组),得到的投运风机数量和风电场低压侧并联谐振频率的关系曲线如图 4 所示。

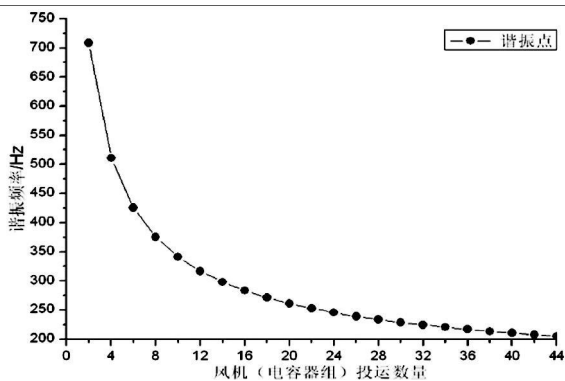


图 4 风电场升压站低压侧谐振点仿真曲线

由图 4 可以看出投运的风电机组(补偿电容器组)越多,谐振频率就越小。运行风电场有 22 台风电机组(补偿电容器组)运行,网侧分别接带谐波含量相同的三相对称负荷与电铁牵引负荷时,风电场升压站低压母线处各次谐波含有率的仿真计算结果如图 5、图 6 所示。

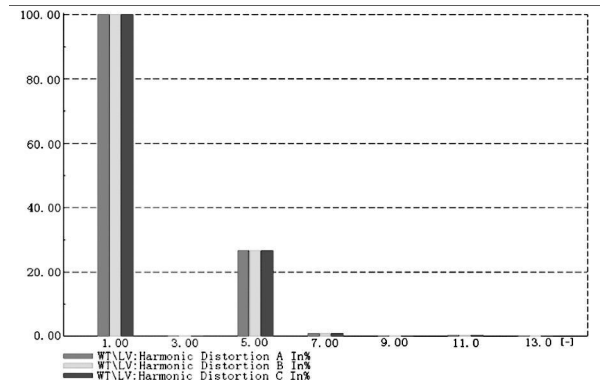


图 5 三相对称谐波注入升压站低压侧谐波含有率

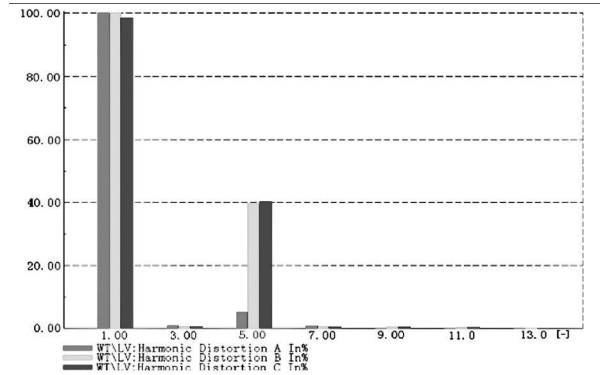


图 6 电铁谐波注入升压站低压侧谐波含有率

通过图 5 可以看出,当网侧接带与电铁负荷谐波含量相同的三相对称负荷时,风电场升压站低压母线处 3K 次谐波含有率为 0,这是因为三相平衡 3K 次谐波主要是零序分量,而风电场升压站采用 YNd11 接线的变压器,阻断了零序电流的流电路径,使网侧 3K 次谐波无法注入风电场。由于发生了频率为 250 Hz 的谐振,升压站低压侧 5 次谐波含有率约为 27%,基波和各次谐波电流均三相对称。由图 6 可以看出,当网侧接带电铁牵引负荷时,不平衡 3K 次谐波不受变压器接线形式的影响会注入风电场。谐振时 B、C 相 5 次谐波含有率约为 40%,远大于三相平衡 5 次谐波含有率。

4.2 电铁暂态谐波引起风电场内部谐振仿真

在电力机车的不同工作阶段中,谐波含量有时会有很大区别。在合主断路器及电力机车经过分区停时,由于机车主变压器磁通不能突变,发生励磁涌流现象。此时,根据主断路器合闸时刻电压初相角的不同,各次谐波的含量变化比较大,馈线电流波形关于横轴不对称,出现间断角且电流波形有尖顶,不仅产生奇次谐波还会产生偶次谐波^[15, 16]。偶次谐波含量相对较小,但注入风电场后如果引起谐振,就有可能造成补偿电容器组的跳闸和风机停运。当水利厅风电场有 14 台风电机组(电容器组)运行,电铁牵引负

荷主断路器合闸时,风电场升压站低压母线处谐波电压序分量值(pu)和各次谐波含有率仿真计算结果分别如图 7、图 8 所示。

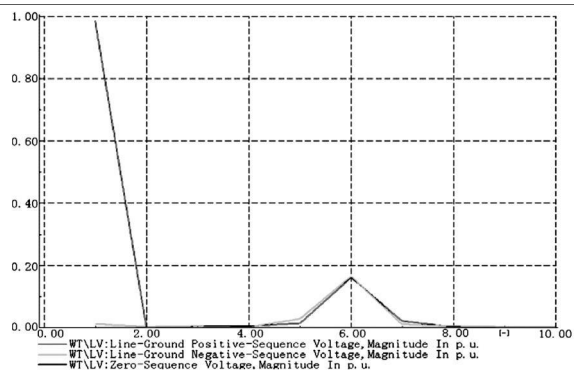


图 7 风电场升压站低压母线各次谐波电压序分量

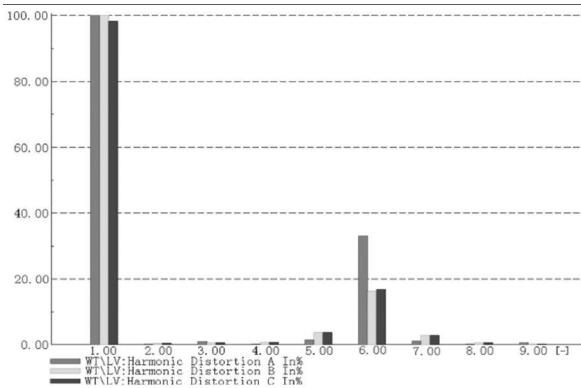


图 8 风电场升压站低压侧各次谐波含有率

由图 7、图 8 可以看出电力机车启动时升压站低压母线处发生了谐振,谐振频率约为 300 Hz,6 次谐波电压正序、负序分量近似相等,零序分量为零,A 相谐波含有率为 32.976%。风电场的谐振点较多且随机变化,在电力机车启动过程中产生的少量偶次谐波注入风电场有可能引发谐振,影响风电场运行特性。

5 结论

包含大量异步风力发电机组的风电场升压站低压侧谐振点频带较宽,谐振频率随着风电机组(补偿电容器组)投运数量的变化而变化。而电铁牵引负荷在不同的工作阶段中会产生谐波幅值、相角以及注入时刻是不确定的,这些谐波注入风电场后很可能引起谐振,造成风电机组跳闸,风电场出力波动。为减小电铁谐波对风电场运行特性的影响,一方面,可以采用在运行过程中产生谐波相对较少的新型电力机车,如动车组;另一方面,对于已投运的风电场应在电铁负荷接入系统后风电场重新进行谐波评估,必要时加装相应的补偿滤波装置;对于待建的风电场,应合理

设计电容器容量,可在串联电抗器上设置多个抽头,组成不同容量的并补装置,进行量化级排列组合调整^[17],也可采用 SVC、STATCOM 等无功补偿装置,或者安装已经实现有功、无功解耦控制的双馈式或者直驱式风电机组,尽量减小电铁谐波对风电场的影响。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 贺建闽, 黄治清. 电气化铁路同次谐波电流叠加 [J]. 供用电, 2004, 15(8): 146-153.
- [3] 董祥, 李群湛. 适用于电气化铁路的无功谐波电流检测方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 32-35.
- [4] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民. 风电场的发电可靠性模型及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-28.
- [5] 赵海翔, 张义斌. 用于计算风电机组并网运行引起全电网电压波动的电流源等效法 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 77-80.
- [6] 黄守道. 风电机组并网问题研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(2): 17-22.
- [7] Klaus-Dieter Detmann and Steffen Schostan. Wind Turbine Harmonics Caused by Unbalanced Grid Currents [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 14(6).
- [8] 徐淑文, 栾兆文. 对电气化铁路所产生谐波的研究 [J]. 电力电容器, 2007, 28(3): 40-45.
- [9] 朱刘柱. 电气化铁路对电网电能质量的影响 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [10] 周逊泉. 电力牵引系统供电方式及其负荷对电能质量影响的分析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [11] 于立珺. 电气化铁路导致电能质量问题的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [12] 高琳. 电铁谐波和负序对变压器保护影响的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [13] 李锋, 陆一川. 大规模风力发电对电力系统的影响 [J]. 中国电力, 2006, 39(11): 80-84.
- [14] 聂静静. 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.

(收稿日期: 2010-10-18)