

风电场谐波分析及治理方案研究

双馈感应电机 (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) 滤波回路的电阻烧毁引起风机停机是一种常见的故障, 根据山西东马坊风电场的实际运行情况, 利用该风电场故障录波器的录波数据, 分析了引起滤波电阻烧毁的谐波电流次数及其来源。针对原有的滤波回路, 提出了一种改进措施以改善其滤波效果。在Matlab/Simulink软件中进行了仿真, 仿真结果验证了所设计滤波回路的有效性, 最后将其应用到东马坊风电场, 成功地解决了风电场的故障停机问题。

王海明 韩肖清 秦文萍 高山山 刘志娟/太原理工大学电气与动力工程学院



王海明/硕士研究生

华能东马坊风电场共安装66台单机容量为1.5 MW的风电机组, 坐落于山西省忻州市宁武县, 地处华北山地地带, 海拔2 000 m左右, 2013年运行小时数为7 841 h/年, 发电量23 307.95万kW·h/年, 可满足宁武县大部分的用电负荷。因此, 该风电场的可靠运行不仅能保证风能资源的充分利用, 还能保证周边负荷的可靠持续供电。

随着电气化铁道的高速发展, 电力电子器件的应用也越来越广泛, 在给人们的出行带来极大便利的同时, 还会给其周边发、用电设备带来巨大的谐波污染^[1-2]。文献[3]提出了包括控制调节系统在内的韶山IV型 (SS4) 电力机车的动态模型, 通过分析影响机车谐波电流的主要随机因素, 给出计算多辆机车产生的随机谐波电流分布函数的方法, 但并未设计滤波器进行谐波治理; 文献[4]通过分析电气化铁道负荷谐波特性, 提出了

一种基于模糊优化方法的电气化铁道谐波治理、无功补偿混合滤波器方案; 文献[5]研究了在小运行方式下电气化铁道负荷注入牵引变电站以及并网母线的谐波电流特性, 通过在供电臂上安装3次、5次和7次滤波器组, 取得了良好的谐波滤除效果, 但并未考虑高次谐波的影响。并网风电场风力发电机的自调节能力很差, 很容易受到来自电网的高次谐波电流的影响以致故障停机, 因此研究电网侧高次谐波电流注入对风电场的影响很有意义。

本文对注入风电场的谐波电流进行了研究, 通过分析风机原有滤波回路等效阻抗伯德图的幅频特性, 得知其不能较好地滤除17次、19次等高次谐波。基于上述缺陷, 通过统计东马坊风电场周边负荷特性, 得出引起故障的原因并对原有滤波回路进行改进, 成功地解决了风机故障停机问题。

风机故障描述

东马坊风电场自2013年7月以来连续发生了8次风机故障停机事故, 累计损失350 A熔断器28个, 125 A熔断器22个, 1 Ω滤波电阻25个; 累计故障停机时间5.5 h; 损失电能2 480 kW·h。2013年10月, 风机故障停机事故更频繁, 给风电场的正常运行带来了巨大的影响。

1. 2013年7月1日风机故障停机

2013年7月1日10:32, 东马坊风电场内13[#]和14[#]两台风机同时报出故障, 故障代码为541和536, 经查阅技术手册可知其为网侧接触器690 V熔断器、变频器

关键词/Keywords

双馈感应电机 ·
滤波回路 ·
谐波电流 ·

山西省科技攻关项目 (20120321005-02, 20130321027-01), 山西省留学人员科技活动择优资助项目。

一般性故障。风电场内DFIG结构如图1所示。

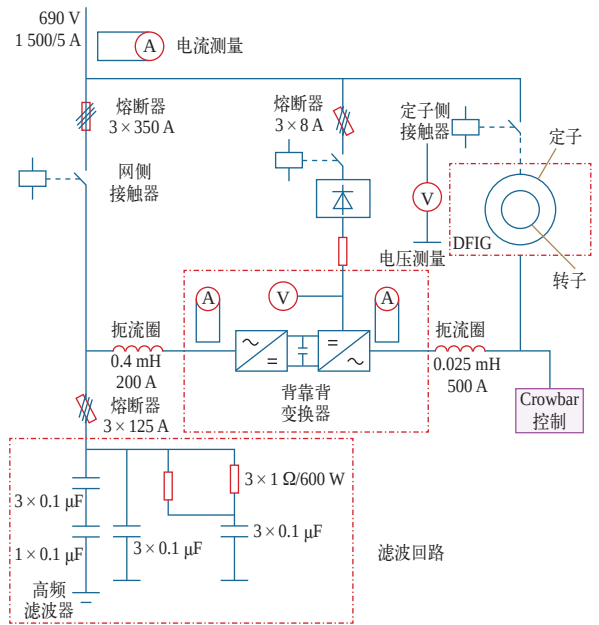


图1 DFIG结构

13[#]和14[#]两台风机位于不同的线路上，风电场变电站内部设备运行正常。350 A和125 A熔断器以及滤波电阻烧毁，详细信息如表1所示。

表1 风机故障统计数据（2013年7月1日）

风机 编号	数量									停机时间 /h	损失电量 /kW·h
	350 A熔断器			125 A熔断器			滤波电阻				
	A	B	C	A	B	C	A	B	C		
13 [#]	1	1	0	1	1	0	2	0	0	1.3	100
49 [#]	1	1	1	1	1	0	2	0	0	0.8	50

2. 2013年7月4日风机故障停机

2013年7月4日02：52，东马坊风电场内14[#]、15[#]、17[#]和18[#]四台风机故障停机，详细信息如表2所示。

表2 风机故障统计数据（2013年7月4日）

风机 编号	数量									停机时间 /h	损失电量 /kW·h
	350 A熔断器			125 A熔断器			滤波电阻				
	A	B	C	A	B	C	A	B	C		
16 [#]	1	1	0	1	1	0	2	2	0	1.4	200
17 [#]	1	1	0	1	1	0	2	0	0	0.6	50
18 [#]	1	1	1	1	1	1	2	0	0	0.9	80

综上所述：350 A和125 A熔断器中的2~3相和滤波电阻中的1~2相烧毁。因此，推断事故由电

网侧过量的不平衡谐波电流注入风机滤波回路导致。通过对风电场周边负荷数据的统计分析，猜想电网侧谐波电流的主要来源为风电场附近的电气化铁道负荷。

风机故障分析

东马坊风电场结构框图如图2所示。

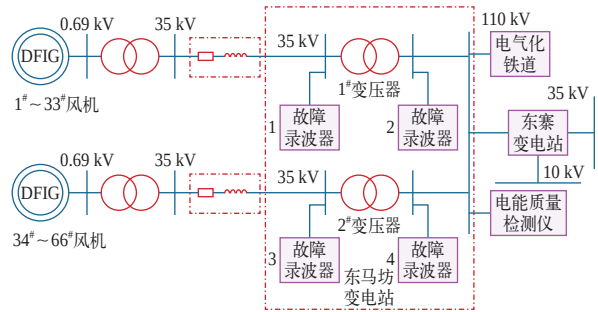
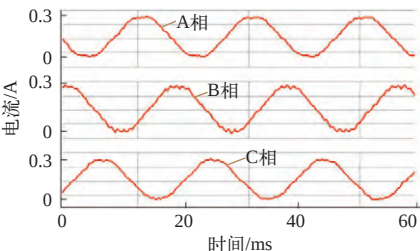
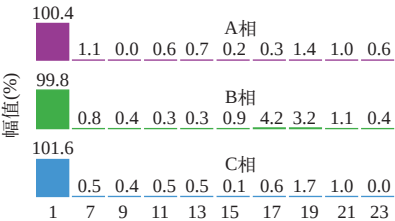


图2 东马坊风电场结构框图

东马坊风电场110 kV和35 kV母线上分别安装了两台故障录波器（见图2），故障期间4台故障录波器同时起动，110 kV母线侧故障录波器2记录的电流波形和谐波频谱分别如图3所示。



(a) 三相电流波形



(b) 谐波频谱

图3 110 kV母线侧故障录波器2录波结果

从图3a中看出，B相电流畸变严重，含有大量高频谐波成分；图3b中看出，三相电流中17次和19次谐波含量均较高，其中B相电流中17次和19次谐波电流含量分别为4.2%和3.2%。

35 kV母线侧故障录波器1记录的电流波形和谐波频谱分别如图4所示。

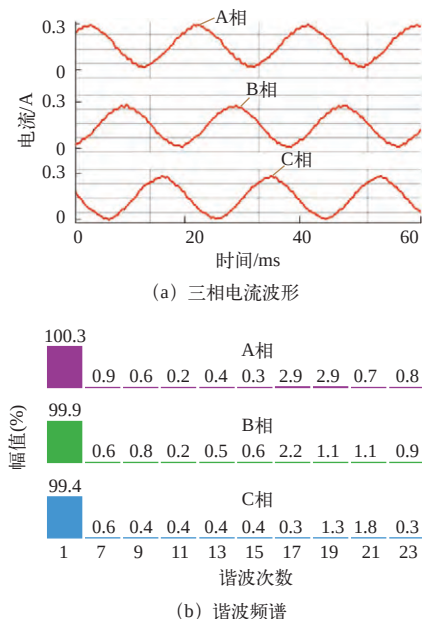


图4 35 kV母线侧故障录波器1录波结果

从图4a中看出，三相电流中均含有谐波成分，其中A相电流畸变最严重；图4b中看出，A相电流中17次和19次谐波成分最高，分别为2.9%和2.9%，B相电流中17次和19次谐波电流含量分别为2.2%和1.1%。综上所述，风电场35 kV和110 kV母线电流中，17次和19次谐波电流含量远大于其他各次谐波，未经滤除直接注入到风电场的风机内部，从而烧毁滤波电阻和熔断器，最终导致严重的风机故障。因此有必要查明17次和19次谐波电流的来源。

东马坊风电场经110 kV传输线路直接接入东寨变电站，东寨变电站的非线性负荷主要为110 kV母线侧电气化铁道，如图2所示，因此在110 kV母线侧安装了一台电能质量检测仪用于检测该母线电流中是否含有谐波成分。风机故障时刻该电能质量检测仪的检测结果如图5所示，其中红、蓝和绿三种颜色分别代表A相、B相和C相。

图5a中，三相电流中含有各次不平衡谐波成分，含量不同，主要由110 kV母线侧的电气化铁道负荷产生。由图5b可见，三相电流中，B相中各次谐波含量最高，特别是17次和19次谐波，与图3b一致。在图5b中，3次、5次、17次和19次谐波

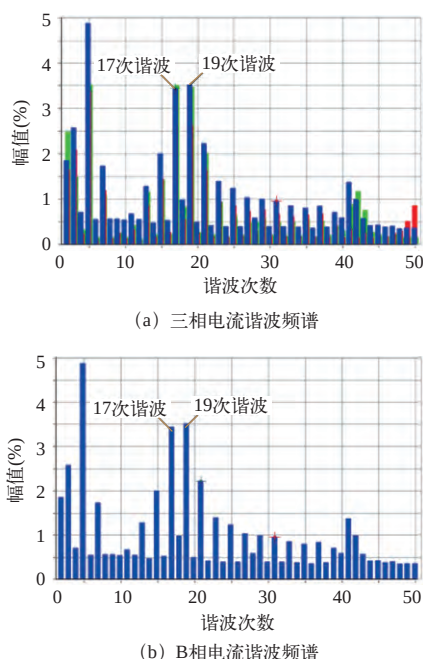


图5 东寨变电站110 kV母线侧电能质量检测仪检测结果

电流含量均超过2.5%，低次谐波电流成分（3次和5次）由东寨变电站内的滤波设备滤除，而17次和19次谐波电流直接通过110 kV传输线路注入风电场，其为东马坊风电场内17次和19次谐波电流的主要来源。

风机故障解决方案

根据电路原理，并联谐振放大谐波电压，串联谐振放大谐波电流，此理论也同样适用于风电场。当电流频率与网络谐振频率一致时，风电场内部发生谐振，这将导致谐波电流的放大。谐振现象会给电网带来巨大损害，因此设计无源滤波器时应特别注意谐振问题。

滤除风电场内部谐波的最常用方法是根据测量和仿真结果设计滤波器，从而避免谐振现象。

在东马坊风电场风机停机事故中，风机故障的主要原因是滤波电阻和熔断器被过量的17次和19次谐波电流烧毁，因此有必要判断是否在滤波回路中发生谐振，并且设计合适的滤波器将其滤除。

1. 滤波回路的设计

东马坊风电场内DFIG的三相滤波回路如图6所示。

图6中，三相滤波回路由1组并联滤波电阻、

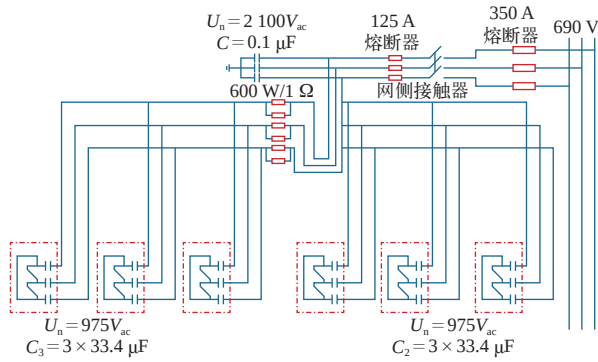


图6 三相滤波回路

1组星形联结电容器组和6组三角形联结电容器组成。星形联结电容器组主要用于滤除背靠背变换器产生的高频谐波电流分量，并且为DFIG提供无功补偿。滤波电阻和三角形连接电容器组主要用于滤除电网侧注入的高频电流分量。简化起见，本文选择单相来分析滤波回路的滤波特性，如图7所示。

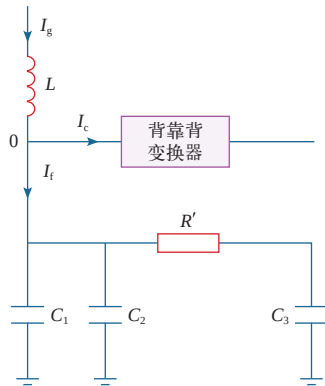


图7 单相滤波回路

图7中， L 为网侧单相等效电感； R' 为单相等效滤波电阻； C_2 和 C_3 为单相等效滤波电容。其中 $R' = 0.5 \Omega$ ， $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$ ， $C_2 = C_3 = 33.4 \mu\text{F}$ 。

图7中 I_g 、 I_f 和 I_c 的关系如下

$$I_g = I_f + I_c \quad (1)$$

式中， I_g 为网侧电流； I_f 为流入滤波回路的电流； I_c 为流入背靠背变换器的电流。

滤波回路的滤波特性可由其等效阻抗的伯德图进行分析，在计算等效阻抗时， C_1 的电容值相对于 C_2 和 C_3 很小，因此可以忽略。频域内滤波回路的等效阻抗 $Z(s)$ 表示如下

$$Z(s) = \frac{1}{C_2 s} // \left(R' + \frac{1}{C_3 s} \right) = \frac{\frac{1}{C_2 s} \left(R' + \frac{1}{C_3 s} \right)}{R' + \frac{1}{C_2 s} + \frac{1}{C_3 s}} \quad (2)$$

$$= \frac{R' C_3 s + 1}{R' C_2 C_3 s^2 + C_2 s + C_3 s}$$

当 $R' = 0.5 \Omega$ ， $C_2 = C_3 = 33.4 \mu\text{F}$ ， $s = j17\omega$ ， $\omega = 100\pi$ 或 $R' = 0.5 \Omega$ ， $C_2 = C_3 = 33.4 \mu\text{F}$ ， $s = j19\omega$ ， $\omega = 100\pi$ 时，式(2)可以转换为式(3)和式(4)，即

$$Z(j17\omega) = 0.1248 - j2.8086 \quad (3)$$

$$Z(j19\omega) = 0.1247 - j2.5142 \quad (4)$$

式(3)和式(4)可以简化为式(5)，即

$$Z(s) = R_f - jX_f \quad (5)$$

式中， R_f 为等效滤波电阻； X_f 为等效滤波电抗。

当式(6)成立时，来自电网的17次和19次谐波电流在滤波回路中发生串联谐振，即

$$X_g = X_f \quad (6)$$

式中， X_g 为等效电网电抗。

根据式(7)和式(8)推导出网侧17次和19次等效电感如式(9)所示，即

$$L_g = X_g / \omega \quad (7)$$

$$\omega = 100\pi \quad (8)$$

$$L_{17} = 0.526 \text{ mH} \quad L_{19} = 0.421 \text{ mH} \quad (9)$$

式中， L_g 为网侧等效电感。

根据电网参数推导出网侧等效电感值如式(10)所示，即

$$L_g \approx 0.0605 \text{ mH} < \min(L_{17}, L_{19}) \quad (10)$$

式中， $\min(L_{17}, L_{19})$ 为 L_{17} 和 L_{19} 中最小值。

根据式(9)和式(10)可知：来自电网侧的17次和19次谐波电流不会在滤波回路中发生串联谐振，因此，东马坊风电场风机故障的主要原因是电网向风电场注入过量的17次和19次谐波电流，而该谐波主要来源于风电场附近的电气化铁道负荷。

风机故障的主要原因是滤波回路中的滤波电阻被过量的17次和19次谐波电流烧毁，因此，可以考虑在电网侧或者风电场侧滤除相关谐波。因为电网110 kV母线侧电气化铁道负荷的谐波电流很大，需要大容量的滤波设备滤除相关谐波电流，

成本很高,而且相关成本由风电场支付,因此本文选择在风电场侧设计一个新的滤波回路来滤除相关谐波,这对于风电场来说是一个更好的选择。

设计无源滤波器时需要考虑的是如果参数选择不当,虽然滤波器能滤除某些确定次数的谐波,但是可能会放大其他次数的谐波^[10]。通过对原有滤波回路进行参数优化,本文设计了一个新的滤波回路,其中,滤波电阻 $R'=0.1\ \Omega$,滤波电

容 $C_1=0.1\ \mu\text{F}$, $C_2=100\ \mu\text{F}$, $C_3=100\ \mu\text{F}$,该滤波回路不仅能够有效地滤除17次和19次谐波电流,而且避免了谐振现象。考虑到图5中原有滤波回路的结构,也可以选择将原有滤波回路中的滤波电容 C_2 和 C_3 由三角形联结改为星形联结,其中, $R=0.1\ \Omega/800\ \text{W}$, $C_1=0.1\ \mu\text{F}$, $C_2=33.4\ \mu\text{F}$, $C_3=33.4\ \mu\text{F}$ 。原滤波回路和改进的滤波回路等效阻抗伯德图如图8所示。

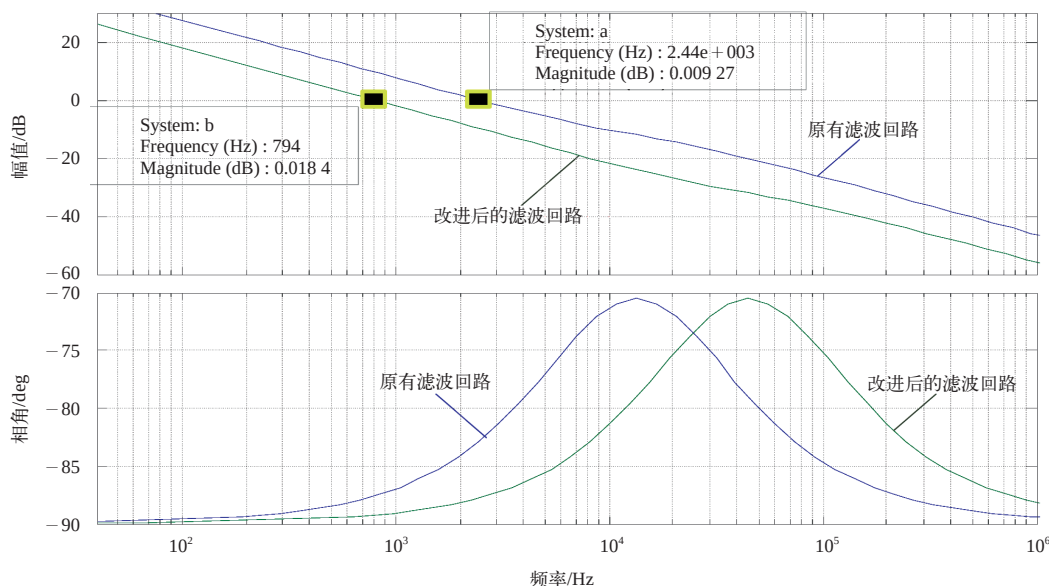


图8 原滤波回路和改进后滤波回路等效阻抗伯德图

图8幅频特性图中,原滤波回路和改进滤波回路的截止频率分别为2.44 kHz和794 Hz。背靠背变换器的截止频率为3 kHz,因此原滤波回路可以滤除其产生的高频谐波电流;改进的滤波回路不仅可以滤除背靠背变换器产生的高频谐波电流,而且也可滤除17次(850 Hz)和19次(950 Hz)谐波电流。原滤波回路中的滤波电阻 $0.5\ \Omega/600\ \text{W}$ 被替换为 $0.1\ \Omega/800\ \text{W}$,因此改进的滤波回路能够承受更大的电流,可以大大避免东马坊风电场的风机故障。

2. 改进滤波回路的滤波效果

本文在Matlab/Simulink中建立了谐波电流源模型用于模拟东马坊风电场的实际情况,仿真结构图如图9所示。

经原滤波回路后电流波形和谐波频谱的仿真

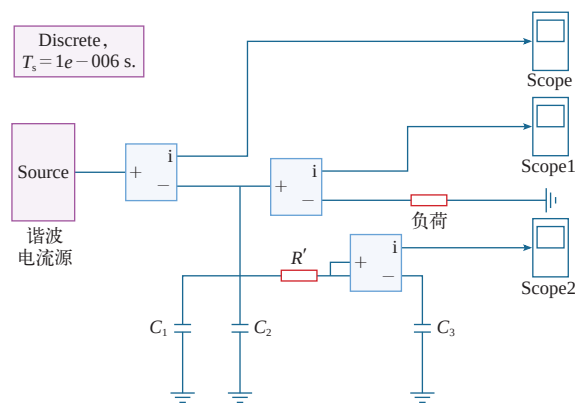


图9 仿真结构图

结果如图10所示。

从图10可以看出,电流中含有大量谐波成分,总的谐波畸变率(THD)高达9.97%,其中17次和19次谐波含量最高,分别为7%和5%。以上情形和东马坊风电场的实际情况一致。改进后的滤波回

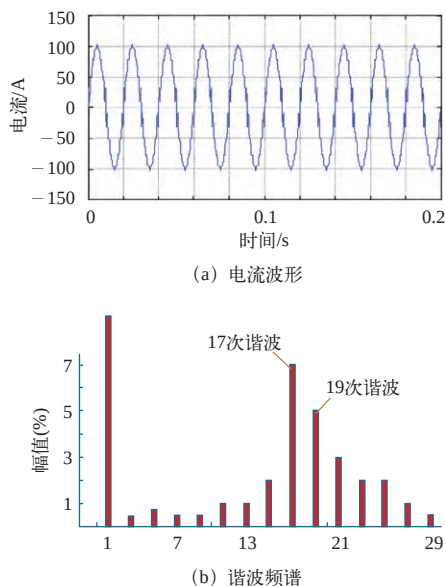


图10 原滤波回路的电流波形和谐波频谱

路电流波形和谐波频谱的仿真结果如图11所示。

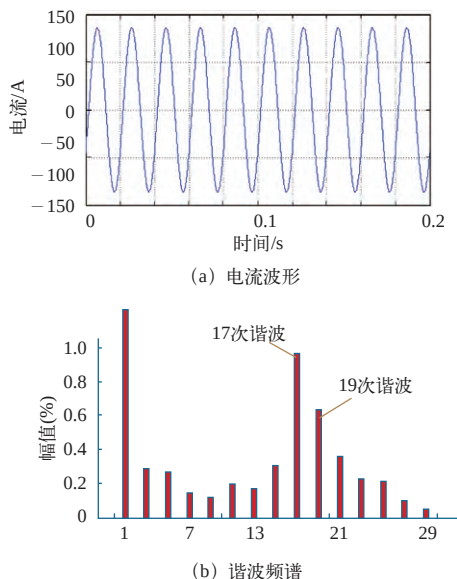


图11 改进滤波回路的电流波形和谐波频谱

从图11看出,改进后滤波回路的电流波形比原电流波形更好,各次谐波含量大大降低,特别是17次和19次。17次谐波电流含量从7%下降到0.95%,19次谐波电流含量从5%下降到0.62%,THD从9.97%下降到1.38%。从上述仿真结果可以看出,改进后滤波回路对17次和19次谐波电流的滤

除效果远远优于原滤波回路。

结束语

本文分析了东马坊风电场风机故障停机事故,统计了风电场35 kV和110 kV母线故障录波器的录波数据以及东寨变电站110 kV母线电能质量检测仪的电流检测结果,得出引起事故的原因并提出解决方案,结果如下。

1) 过量的17次和19次谐波电流注入风机,导致风机故障停机,通过计算分析得知这些过量谐波电流并不是由串联谐振引起,主要来源于风电场附近的电气化铁道负荷。

2) 通过分析风机原滤波回路等效阻抗伯德图的幅频特性得知,它不能有效地滤除17次和19次谐波电流。

3) 对原有滤波回路进行参数优化设计,得到了一种改进的滤波回路,仿真和实际应用结果验证其能较好地滤除17次和19次谐波电流,并且与原回路相比能够承受更大的电流,从而成功地解决了风电场故障停机事故。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 孟志强.高次谐波对牵引网保护的危害及改进措施[J].电气化铁道,2006(S1):131-134.
- [3] 韩奕,李建华,黄石柱,等.SS4型电力机车的动态模型及随机谐波电流计算[J].电力系统自动化,2001,25(4):31-36.
- [4] 任震,余得伟,唐卓尧.基于模糊优化设计的混合滤波器——治理电气化铁道谐波的一种新方法[J].中国电机工程学报,2001,21(2):66-69.
- [5] 武中,王志刚,宋述勇,等.电气化铁道牵引变电所对电力系统影响及治理的仿真研究[J].中国电机工程学报,2011(S1):77-82.

(收稿日期:2014-08-18) EA