

谐振引起的牵引变电所无功补投切故障分析

曹建设

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 电气化处, 陕西 西安 710043)

摘要: 某牵引变电所 TCR 型动态无功补偿装置在进行设备投运时, 发生 2 次谐波放大现象, 导致牵引变电所继电保护装置频繁跳闸。结合 SVC 投切试验现象, 对投切故障进行了分析。在工频频率下, SVC 滤波支路的容抗远大于系统感抗, 不会产生并联谐振。但对谐波频率而言, 系统感抗大幅增加而滤波支路容抗大幅减小。当电力系统短路容量过小时, 系统阻抗和滤波支路参数构成并联谐振, 导致 TCR 产生的 2 次谐波被放大, 从而引起 SVC 投切时牵引变电所断路器跳闸。

关键词: 动态无功补偿; 滤波支路; 谐波; 并联谐振; 短路容量

中图分类号: TM 922.4; TM 761⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0094-04

0 引言

电气化铁道牵引负荷随着线路坡度、牵引或制动等不同运行条件而剧烈变化。在无功“反送正计”计量方式下需对采用固定并联电容补偿的有效性进行评价^[1-2]。TCR 型动态无功补偿装置能够随着牵引负荷的变化快速对无功补偿容量进行调整, 在负荷变化较大的电气化铁路中已经推广采用。但某牵引变电所 TCR 型动态无功补偿装置在进行设备投运时, 发生 2 次谐波放大现象, 导致牵引变电所继电保护装置频繁跳闸。

1 牵引变电所情况介绍

1.1 牵引变压器参数

该牵引变电所供电范围约 30.47 km, 其中 CA 相供电臂长 21 km, 该供电臂中存在 20.05 km 的特长隧道, 隧道最大坡度 11‰, BC 相供电臂长 9.47 km。该牵引变电所采用高过载低阻抗的三相 V/V 接线型式牵引变压器, 牵引变压器安装容量为 $2 \times (20 + 16) \text{ MV} \cdot \text{A}$, 短路电压百分值 8.4%, 油浸自冷并预留风冷条件。

1.2 牵引变电所外部电源情况

该牵引变电所的 2 路外部电源进线分别经 110 kV 地方 A 变和 B 变从 330 kV 地方 C 变和 D 变引出。C 变和 D 变距离该牵引变电所分别为 94 km 和 59 km。根据电力系统资料显示, 大运行方式下系统归算至该牵引变电所 110 kV 母线阻抗标么值为 0.2756, 即系统短路容量为 $363 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。外部电源非常薄弱, 系统短路容量小, 电力系统供电能力严重不足。

1.3 TCR 型动态无功补偿装置

该牵引变电所采用的 TCR 型动态无功补偿装

置的结构简图如图 1 所示。

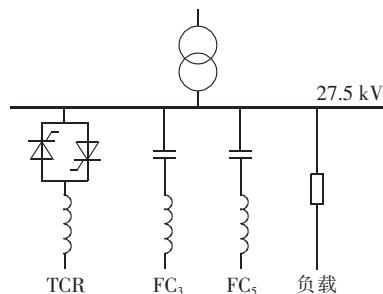


图 1 TCR 型动态无功补偿装置的原理图

Fig.1 Schematic diagram of TCR-type dynamic reactive compensator

母线电压不变时, 3 次滤波支路 FC_3 和 5 次滤波支路 FC_5 提供固定的容性无功功率 Q_F 。TCR 产生的无功功率 Q_T 随负载无功功率 Q_L 的变化而变化, 且两者之和为感性无功功率, 在一定范围内维持恒定, 与 FC 提供的容性无功功率相抵消, 使系统供给的无功功率 Q_S 维持不变, 电网功率因数保持在较高水平, 同时使接触网电压保持在规定的范围内, 即

$$Q_S = Q_L + Q_T - Q_F \quad (1)$$

SVC 最大无功补偿容量应该和设计线路牵引负荷的大小相适应。由于牵引供电计算中的短时最大工作电流能够体现供电臂内的列车运行状态, 甚至列车数量的变化, 计算最大无功补偿容量时应采用短时最大工作电流作为馈线的最大电流^[3]。该牵引变电所 27.5 kV 侧 CA 相 3 次滤波支路安装容量为 $32 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 5 次滤波支路安装容量为 $10.24 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。3 次滤波支路补偿容量 $15.59 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 5 次滤波支路补偿容量 $7.1 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 总补偿容量 $22.69 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

2 SVC 投切试验

为了解决牵引变电所动态无功补偿装置投切故障对铁路安全运营造成的潜在威胁, 铁路运营部门组织相关单位对动态无功补偿装置进行了多次投切

试验。试验中发现,单独投运3次或5次滤波支路无谐波放大现象,单独投运TCR部分也没有发生谐波放大现象。当TCR和3次滤波支路同时投入运行时,主变与SVC装置之间就会产生2次谐波放大现象。TCR和3次滤波支路、5次滤波支路同时投入运行时,也会发生2次谐波放大现象。TCR中的电流可以放大到200 A,系统中的2次谐波电流甚至会放大到400 A以上。

谐波放大直接导致主变工作不正常并且伴有异常声音,母线电压异常波动,继电保护装置频繁跳闸。

根据电能质量分析仪抓录到的波形,投上无功补偿装置后,系统电网2次谐波电流 $i_{s,2}$ 放大的典型波形如图2所示。

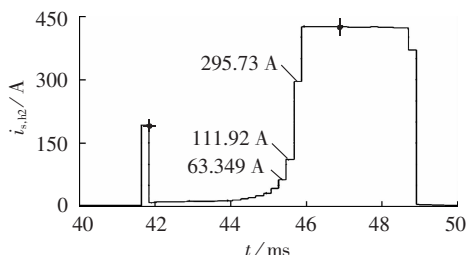


图2 系统电网2次谐波电流的典型放大波形

Fig.2 Typical magnified second harmonic current of power system

TCR中2次谐波电流 $i_{TCR,2}$ 放大的典型波形如图3所示。

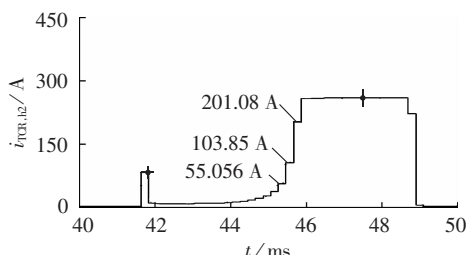


图3 TCR中2次谐波电流的典型放大波形

Fig.3 Typical magnified second harmonic current of TCR

牵引负荷一般不产生2次谐波。作为一种电感负载的单相交流调压电路,晶闸管控制电抗器产生的谐波也主要以奇次谐波为主。电流谐波有效值表达式如下^[4]:

$$I_n = \frac{2U_s}{\pi \omega L} \left[\frac{\sin(n+1)(\alpha - \pi/2)}{n+1} - \frac{\sin(n-1)(\alpha - \pi/2)}{n-1} - \frac{2\sin(\alpha - \pi/2)\sin n(\alpha - \pi/2)}{n} \right] \quad (2)$$

其中, U_s 为电源电压的有效值; α 为相位控制角; n 为高次谐波次数, $n=3,5,7,\dots$; L 为电感。

但是,由于TCR控制系统的触发电路触发不规则,在整流系统中同样会产生少量的偶次谐波。各种模式的触发不规则是由如下原因引起的:脉冲偏移;

相间不平衡;组间不平衡^[5]。在只投入TCR手动触发时,现场测出的最大2次谐波电流约为7 A。

3 SVC投切故障原因分析

根据以上试验现象,工程技术人员初步推测是由于电力系统短路容量过小,同时TCR触发回路产生了2次谐波,无功补偿滤波支路和系统构成并联谐振,导致2次谐波进一步放大,从而引起动态无功补偿装置投切时断路器跳闸。

3.1 无功补偿装置运行后谐波放大的机理

在工频率下,滤波装置的容抗远大于系统感抗,不会产生并联谐振。但对谐波频率而言,系统感抗大幅增加而容抗大幅减小,就可能产生并联谐振^[6-9]。系统阻抗和滤波支路参数并联谐振的原理图如图4所示。

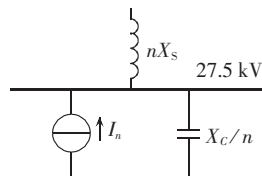


图4 系统和滤波支路并联谐振原理图

Fig.4 Schematic diagram of parallel resonance composed of system and filter circuit

图4所示的电路在满足表达式(3)的情况下会发生并联谐振。

$$nX_s = X_c/n \quad (3)$$

其中, X_s 为系统基波电抗; X_c 为补偿电容器的基波电抗。

在实际的TCR型动态无功补偿装置中,为了限制电容器支路中的谐波电流放大和防止电容器投入时的合闸涌流,在电容器支路中都串入了一定容量的电抗器。传统串联电抗率配置3次滤波支路通常为12%~13%,5次滤波支路通常为5%~6%^[10-11]。也有文献通过理论分析提出设计选择电容器组的串联电抗率时,应考虑在不同条件下系统阻抗频率特性所对应的并联谐振点及系统可能出现的各次谐波分布特性^[12]。

设所串电抗器的基波电抗为 X_L ,则对 n 次谐波电抗为 nX_L ,电路满足并联谐振的条件为

$$nX_s = X_c/n - nX_L \quad (4)$$

谐振次数为

$$n = \sqrt{X_c / (X_s + X_L)} \quad (5)$$

谐振频率 f_p 为

$$f_p = 50 \times \sqrt{X_c / (X_s + X_L)} \quad (6)$$

设谐波源电流为 I_n ,流入系统的谐波电流 I_{sn} 和流入电容器的谐波电流 I_{cn} 分别为

$$I_{sn} = \frac{nX_L - X_c/n}{nX_s + (nX_L - X_c/n)} I_n \quad (7)$$

$$I_{Cn} = \frac{nX_S}{nX_S + (nX_L - X_C/n)} I_n \quad (8)$$

在电容器支路中串入电抗器后,谐振频率下降,谐波放大频段的宽度变窄,这对减小谐波电流的放大作用还是很有效的。

3.2 参数计算

3.2.1 系统综合谐波阻抗

为校核并联电容补偿装置的谐波能力,需要计算包括牵引变压器在内的系统综合谐波阻抗值。

大运行方式下,电力系统归算到 27.5 kV 侧的阻抗 X'_S 为

$$X'_S = \frac{U_b^2}{S_0} \left(\frac{27.5}{110} \right)^2 \quad (9)$$

其中, U_b 为基准电压; S_0 为系统短路容量。

三相 V/V 接线型式牵引变压器的阻抗 X_T 为

$$X_T = \frac{U_d \%}{100} \frac{U_N^2}{S_N} \quad (10)$$

其中, $U_d \%$ 为牵引变压器短路电压百分比; U_N 为变压器额定电压(kV); S_N 为变压器额定容量(MV·A)。

系统综合谐波阻抗 X_S 为^[13]

$$X_S = n(2X'_S + X_T) \quad (11)$$

考虑系统电阻 R_S 后,式(11)变为

$$X_S = 2R_S + n(2X'_S + X_T) \quad (12)$$

3.2.2 3 次滤波支路和 5 次滤波支路参数

该牵引变电所 3 次、5 次滤波支路电容基波电抗分别为

$$X_{C3} = U_{CN}^2 / Q_3 \quad (13)$$

$$X_{C5} = U_{CN}^2 / Q_5 \quad (14)$$

其中, U_{CN} 为电容器组的额定电压(kV); Q_3 、 Q_5 分别为 3 次、5 次滤波支路的安装容量(MV·A)。

3 次、5 次滤波支路的电感基波电抗分别为

$$X_{L3} = X_{C3} a_3 \quad (15)$$

$$X_{L5} = X_{C5} a_5 \quad (16)$$

其中, a_3 、 a_5 分别为 3 次、5 次滤波支路的调谐系数。

3.3 系统和无功补偿装置并联运行的谐振分析

根据式(6),当 TCR 和 3 次滤波支路投入运行后,系统和动态无功补偿装置并联运行的谐振频率 f_P 为

$$f_P = 50 \times \sqrt{X_{C3} / (X_S + X_{L3})} \quad (17)$$

将 $X_S = 7.336n + 0.625 \Omega$ 、 $X_{C3} = 55.125 \Omega$ 、 $X_{L3} = 6.615 \Omega$ 代入式(17),求解可得: $f_P = 98.283 \text{ Hz}$ 。

因此,当 TCR 和 3 次滤波支路同时投入运行后,系统和 3 次滤波支路发生并联谐振,会对 TCR 产生的 2 次谐波进一步放大。根据式(7),理论上流入系统的 2 次谐波电流将被放大约 15 倍。TCR 和 3 次、5 次滤波支路同时投入运行时,系统和 3 次、5 次滤波支路并联谐振原理图见图 5。

在 n 次谐波次数下,3 次和 5 次滤波支路并联后的等效阻抗为

$$\frac{(-X_{C3}/n + nX_{L3})(-X_{C5}/n + nX_{L5})}{(-X_{C3}/n + nX_{L3}) + (-X_{C5}/n + nX_{L5})} \quad (18)$$

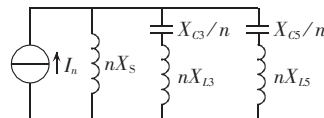


图 5 系统和 3 次、5 次滤波支路
并联谐振原理图

Fig.5 Schematic diagram of parallel resonance
composed of system, 3rd filter circuit
and 5th filter circuit

考虑系统参数后,总的等效阻抗为

$$\begin{aligned} & nX_S(-X_{C3}/n + nX_{L3})(-X_{C5}/n + nX_{L5}) \div \\ & \{nX_S[(-X_{C3}/n + nX_{L3}) + (-X_{C5}/n + nX_{L5})] + \\ & (-X_{C3}/n + nX_{L3})(-X_{C5}/n + nX_{L5})\} \end{aligned} \quad (19)$$

令上式分母等于 0,并将 $X_S = 7.336n + 0.625 \Omega$ 、 $X_{C3} = 55.125 \Omega$ 、 $X_{L3} = 6.615 \Omega$ 、 $X_{C5} = 110.12 \Omega$ 、 $X_{L5} = 4.492 \Omega$ 代入,可得关于谐振次数 n 的解析表达式。

$$n^4 + 0.0624n^3 - 19.68n^2 - 0.9288n + 54.59 = 0 \quad (20)$$

对上式进行求解,可得 $n = 1.8003$,谐振频率约为 90.015 Hz。

根据谐波电流分流值按阻抗大小成反比关系,可分别得到电源侧 2 次谐波的放大倍数 k_S 、3 次滤波支路及 5 次滤波支路的放大倍数 k_3 和 k_5 的表达式。

$$\begin{aligned} k_S &= \frac{(-X_{C3}/2 + 2X_{L3})(-X_{C5}/2 + 2X_{L5})}{(-X_{C3}/2 + 2X_{L3}) + (-X_{C5}/2 + 2X_{L5})} \div \\ & \left[X_{S2} + \frac{(-X_{C3}/2 + 2X_{L3})(-X_{C5}/2 + 2X_{L5})}{(-X_{C3}/2 + 2X_{L3}) + (-X_{C5}/2 + 2X_{L5})} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} k_3 &= X_{S2}(-X_{C5}/2 + 2X_{L5}) / \{X_{S2}[(-X_{C3}/2 + 2X_{L3}) + \\ & (-X_{C5}/2 + 2X_{L5})] + (-X_{C3}/2 + 2X_{L3}) \times \\ & (-X_{C5}/2 + 2X_{L5})\} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} k_5 &= X_{S2}(-X_{C3}/2 + 2X_{L3}) / \{X_{S2}[(-X_{C3}/2 + 2X_{L3}) + \\ & (-X_{C5}/2 + 2X_{L5})] + (-X_{C3}/2 + 2X_{L3}) \times \\ & (-X_{C5}/2 + 2X_{L5})\} \end{aligned} \quad (23)$$

其中, X_{S2} 为 2 次谐波下的系统综合谐波阻抗。

代入参数可得: $k_S = 2.51$, $k_3 = 2.673$, $k_5 = 0.832$ 。

由此可见,2 次谐波在电源侧和 3 次滤波支路均被放大。TCR 产生的 2 次谐波,经系统阻抗和滤波回路并联放大后,会扩大母线电压的畸变。采集畸变的系统电压、电流波形信号,并对采集到的信号进行 FFT 变换,最终产生相应触发延迟角的晶闸管触发脉冲,会使得 TCR 的电流不对称,2 次谐波被进一步放大。最终导致 TCR 型动态无功补偿装置投运时,牵引变电所继电保护装置跳闸。

TCR 触发回路产生少量的 2 次谐波是不可避免的。该牵引变电所 SVC 投切故障的根本原因是由于电力系统短路容量太小,无功补偿滤波支路和系统构成并联谐振,对 2 次谐波进行了放大,从而导致 SVC 投运时频繁跳闸。

4 牵引变电所以对电力系统短路容量的要求

为了确保列车的正常运行,电力机车受电弓上最低工作电压为 20 kV,在供电系统非正常情况下不低

于 19 kV。电气化铁路牵引供电系统的电压水平受电力系统电压损失、牵引变压器电压损失和牵引网电压损失三方面的制约^[13]。电力系统电压损失与系统短路容量密切相关。系统短路容量越大,则冲击性负载引起的电压波动越小。

文献[14]认为:为满足电气化铁路供电对综合压降的需求,电力系统必须保证牵引变压器高压侧接入系统连接点的最小短路容量达到一定的水平。常用的 3 种牵引变压器额定容量分别为 31.5 MV·A、40 MV·A、50 MV·A,对应的系统最小短路容量必须分别达到 550 MV·A、800 MV·A 和 2 400 MV·A 以上,这样才能满足机车供电对电压降的要求^[14]。文献[15]的研究结论更为保守,认为对于常速普通电气化铁路,系统短路容量应为牵引变容量的 25~38 倍。

该牵引变电所最大运行方式下系统短路容量为 363 MV·A,仅为牵引变压器安装容量的 10 倍。根据现场测试结果,该牵引变电所的系统进线电压损失 12.6 kV,为额定电压的 18.97%,远低于电能质量国标 GB/T12325-2003《电能质量-供电电压允许偏差》中“供电电压正负偏差的绝对值之和不超过额定电压 10%”的要求。

GB/T15543-1995《电能质量-三相电压允许不平衡度》规定,电力系统公共连接点的正常电压不平衡度允许值为 2%,短时不得超过 4%。因此,可以按正常不超过 4% 来限制三相电压不平衡度。根据标准给出的计算公式,则可以得出接入系统公共连接点的最小短路容量至少应为单相负荷容量的 25 倍。

在电力系统短路容量不满足上述要求的情况下,牵引变电所有必要考虑接入更高的电压等级。

5 结论

a. 在负荷变化较大的电气化铁路中,采用 TCR 型动态无功补偿装置能够随着牵引负荷的变化快速对无功补偿容量进行调整。应采用短时最大工作电流确定 SVC 的最大无功补偿容量。

b. 牵引负荷一般不产生 2 次谐波,TCR 产生的谐波也主要以奇次谐波为主。但是,由于 TCR 控制系统的触发电路触发不规则,在整流系统中仍然会产生少量的偶次谐波。现场测出的最大 2 次谐波电流约为 7 A。

c. 电力系统与牵引变压器构成的综合系统,与滤波回路之间构成了并联谐振,将 TCR 产生的 2 次谐波进行放大,从而导致了牵引变电所继电保护装置频频跳闸。

d. 对于普速电气化铁路,为了满足电气化铁路供电对综合压降的需求,并按正常情况下不超过 4% 来限制三相电压不平衡度,牵引变压器高压侧接入系统连接点的最小短路容量至少应为牵引变容量的 25 倍。在不满足上述要求的情况下,牵引变电所有必要考虑接入更高的电压等级。

参考文献:

- [1] 贺建闽,黄治清,李群湛. 牵引变电所固定并联电容补偿有效性评价[J]. 铁道学报,2004,26(3):41-45.
HE Jianmin, HUANG Zhiqing, LI Qunzhan. Evaluation of the fixed parallel capacitor compensation used in traction substation [J]. Journal of China Railway Society, 2004, 26(3): 41-45.
- [2] 张丽,李群湛,贺建闽. 无功返送正计条件下最佳固定补偿容量的选择[J]. 铁道学报,2003,25(2):35-38.
ZHANG Li, LI Qunzhan, HE Jianmin. On the fixed compensation capacity optimize under the reactive power absolute measurement [J]. Journal of China Railway Society, 2003, 25(2): 35-38.
- [3] 杲秀芳. 牵引变电所动态无功补偿方案设计研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(3):28-32.
GAO Xiufang. Research on scheme design of dynamic reactive compensation in traction substation [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(3): 28-32.
- [4] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2006:110.
- [5] NATARAJAN R. 电力电容器[M]. 徐政,译. 北京:机械工业出版社,2007:237-238.
- [6] 同向前,申明,李牧. 单调谐波滤波器的滤波特性与短路比的关系[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):62-69.
TONG Xiangqian, SHEN Ming, LI Mu. Relation between short-circuit-ratio and single-tuned filter performance [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 62-69.
- [7] 谷毅,赵玉柱,张国威. 关于 500 kV 东明开关站启动调试期间发生电压谐振的分析[J]. 电网技术,2002,26(12):71-74.
GU Yi, ZHAO Yuzhu, ZHANG Guowei. Discussion on voltage resonance occurred in Bao-Ren 5231 transmission line during start up of Dongming switching station [J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 71-74.
- [8] 赵书强,马燕峰,贺春. 抑制谐波的配电网无功优化规划[J]. 电网技术,2004,28(6):71-75.
ZHAO Shuqiang, MA Yanfeng, HE Chun. Reactive power optimal planning of distribution network with harmonic mitigation [J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 71-75.
- [9] 宋文南,刘宝仁. 电力系统谐波分析[M]. 北京:水利电力出版社,1995:112.
- [10] 张承容,卢本平,何光煜,等. CECS32:91 并联电容器用串联电抗器设计选择标准[S]. 北京:中国计划出版社,1992.
- [11] 杨昌兴,华水荣. 关于串联电抗器选用疑题的剖析[J]. 电力电容器,2001(4):15-20.
YANG Changxing, HUA Shuirong. Analysis of the knotty problem in series reactor selection [J]. Power Capacitors, 2001(4): 15-20.
- [12] 杨汾艳,徐柏榆,梅桂华. 交直流混合电网中变电站电容器组串联电抗率选择[J]. 电力自动化设备,2009,29(6):29-34.
YANG Fenyang, XU Baiyu, MEI Guihua. Selection of series reactance ratio of substation capacitor banks in AC/DC hybrid power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 29-34.
- [13] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院. 电气化铁道设计手册牵引供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社,1988:185.
- [14] 于坤山,林海雪,周泽昕,等. 电铁供电接入电压等级及谐波治理问题的研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2006.
- [15] 清华大学电机工程系柔性输配电系统研究所. 电气化铁道外部电源供电方案研究[R]. 北京:清华大学,2006.

(编辑:柏英武)

作者简介:

曹建设(1977-)男,江苏邳州人,工程师,注册电气工程师,硕士,研究方向为电气化铁道牵引供电系统设计(E-mail: jianshecao@163.com)。

(下转第 102 页 continued on page 102)

Analysis of dynamic reactive compensator switching fault induced by resonance

CAO Jianshe

(Electrification Department, China Railway First Survey & Institute Group, Xi'an 710043, China)

Abstract: When the TCR-type dynamic reactive compensator of a traction substation is put into operation, the second harmonic is magnified, which causes the frequent tripping of its protections. Combined with the SVC tests, the switching fault is analyzed. At power frequency, since the capacitive reactance of SVC's filter circuit is much larger than system inductance, the parallel resonant could not happen. But at the harmonic frequency, the system inductance increases greatly and the reactance of the filter circuit reduces greatly. When the short-circuit capacity of power system is too small, the system impedance and the filter circuit parameter may form a parallel resonance, resulting in the magnified second harmonic and then the breaker tripping.

Key words: dynamic reactive compensation; filter branch; harmonics; parallel resonant; short circuit capacity