

# 利用无源滤波器抑制励磁涌流 引发谐波过电压可行性分析

滕予非 汤 凡 魏 巍 李 甘 丁理杰 张 华  
( 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘要:** 针对西南某藏区电网,对利用无源滤波器抑制励磁涌流引发谐波过电压风险的可行性进行了探讨。首先,分析了在该工况下无源滤波器的设计原则,并利用 PSCAD/EMTDC 软件对滤波器的效果进行了校核。其次,探讨了无源滤波器投入对弱联系电网孤网后的高频高压风险的影响,并提出了相应的抑制措施。

**关键词:** 无源滤波器; 励磁涌流; 过电压

**Abstract:** The feasibility on harmonic overvoltage caused by the suppression of inrush current with passive filter is discussed aiming at a Tibetan power grid in Southwest China. Firstly, the design principle of passive filter which is utilized to suppress harmonic overvoltage is proposed. And the filtering effect is checked by PSCAD/EMTDC. The influence on self-excitation of the filter is also proposed, and the corresponding suppression measures are introduced.

**Key words:** passive filter; inrush current; overvoltage

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0010-04

## 0 引言

随着中国电力系统的发展以及经济水平的提高,送电网络逐渐地向边远无电地区延伸。但由于这些无电地区负载较小,且往往远离负荷中心,在建设的初期,这些地区与主网之间往往仅通过一回联络线相连,而且该联络线的距离一般都较长。联络线这种轻载长线的特性,为低次谐波的传播与放大提供了极好的条件。

根据传输线理论<sup>[1,2]</sup>,对于空载长线路,当其距离与输电波的 1/4 波长相等时,在线路末端谐波电压可能会被严重放大,从而造成严重的电压畸变,导致设备损毁。因此对于低次谐波而言,当输电线路距离接近 300~750 km 时,2~5 次谐波则有在末端放大的危险。此时,如果在系统对空载变压器进行合闸操作,其注入的励磁涌流<sup>[3,4]</sup>则可能在系统末端产生较大的过电压<sup>[5]</sup>。

2013 年中国西南某藏区电网出现了因励磁涌流的注入,而在电网末端产生谐波过电压的事件。根据录波数据,此次事件中系统末端 35 kV 母线的电压瞬时值达到了正常情况的 1.9 倍,对设备以及负荷的安全带来了极大的威胁。

在抑制励磁涌流引发谐波过电压的措施方面,存在着从源头治理<sup>[6]</sup>以及改变系统网络特性<sup>[1]</sup>两种方式。下面以西南某藏区电网为算例,着重分析了通过在系统中增加无源滤波器抑制谐波过电压的思路,探讨了其可行性。

## 1 研究算例及其谐波过电压风险

### 1.1 算例系统介绍

利用西南某藏区电网作为算例系统。

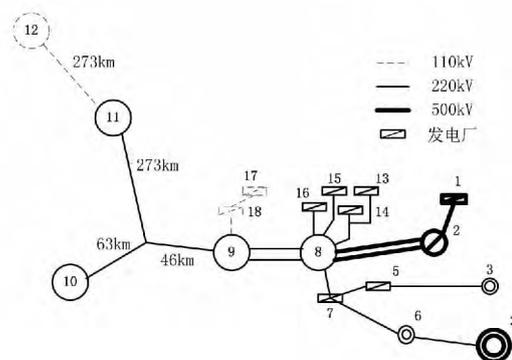


图 1 算例系统

该系统中,11 号母线以及 12 号母线所处的变电站即为边远地区变电站,其与主网(9 号母线以右的系统)之间的最远传输距离接近 600 km,处在 300

~750 km 的范围之内。同时 11 号母线与 12 号母线的总下网负荷仅有 2 MW 左右。因此,母线 9 ~ 母线 12 的联络线具有明显的轻载长线路的特性。一旦从 9 号母线注入低次谐波,在 12 号母线的低压侧则会出现明显的电压畸变,甚至出现谐波过电压。

### 1.2 算例系统谐波过电压仿真分析

利用 PSCAD/EMTDC 软件对图 1 所示系统进行电磁暂态仿真分析,仿真结果验证了以上判断。以在 1 号母线对 550 MVA 空载变压器进行合闸操作为例,可以得到在枯期小方式下,12 号母线 35 kV 侧的电压瞬时值波形如图 2 所示。

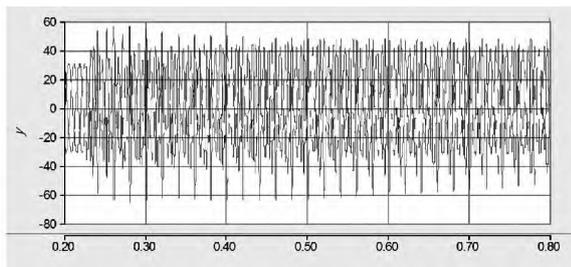


图 2 12 号母线 35 kV 侧的电压瞬时值波形

由图 2 所示,此时 12 号母线 35 kV 侧的电压瞬时值接近 2.0 倍,远远超过了系统允许的范围,设备损毁风险较高,需要采取措施进行抑制。

## 2 无源滤波器设计原则

为了抑制励磁涌流引发的谐波过电压,需要在系统中装设无源滤波器。根据规划,考虑到未来还会有部分 110 kV 变电站从 11 号母线上网,为了提高适应性,特将滤波器装设在 11 号母线的低压侧。以下将对滤波器的设计原则进行探讨。

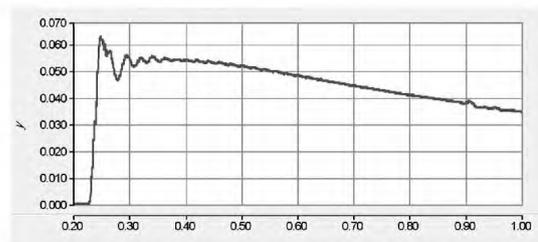
### 2.1 滤波器谐振点选择

考虑到励磁涌流中主要含有 2、3、4、5 次谐波,因此滤波器的设计主要为 2、3、4、5 次各次的单调谐滤波器。根据常规的设计方法,滤波器的调谐频率往往会低于目标频率,如 1.9、2.8 次等。如此可以防止滤波器电容器使用时间较长时,其介质材料会退化,从而导致的电容值下降,谐波频率升高。

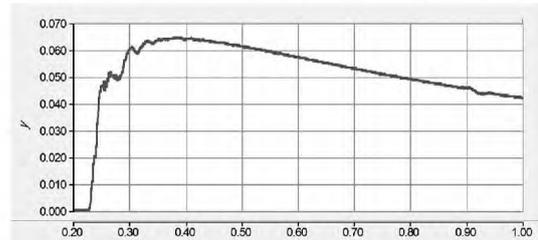
这样设计的前提是将交流电网等效为一个纯电感,但是这样的设计方式在图 1 所示的地区电网中可能具有较大的风险。

以 3.9 次频率为滤波器的调谐频率,在 11 号母线 35 kV 侧增加滤波器前后,流入母线 11 ~ 母线 12

输电线路的 4 次谐波电流有效值如图 3 所示。



(a) 增加滤波器前流入 11-12 线路的 4 次谐波电流



(b) 增加滤波器后流入 11-12 线路的 4 次谐波电流

图 3 4 次谐波电流有效值

由图 3 可知,在增加滤波器后流入 11 ~ 12 线路的 4 次谐波电流反而有增大的趋势。分析其原因,主要是由于谐波频率超过了滤波器谐振频率,因此滤波器呈感性。但是,由于图 1 所示地区电网从 11 号母线往里看,11 ~ 12 线与 12 号变电站则主要呈容性。因而出现了谐波电流的放大情况。

为了避免该情况的出现,最好能够保证滤波器能够在谐波下呈现容性阻抗,因此在弱联系电网中,滤波器的调谐频率可能需要高于目标频率。

### 2.2 滤波器容量选择

滤波器设计中,滤波器容量关系到电容值的选择,因此也直接关系到设备选型与滤波效果。

根据分析,滤波器容量主要跟以下两个因素有关。首先是滤波器的品质因素  $Q$ 。

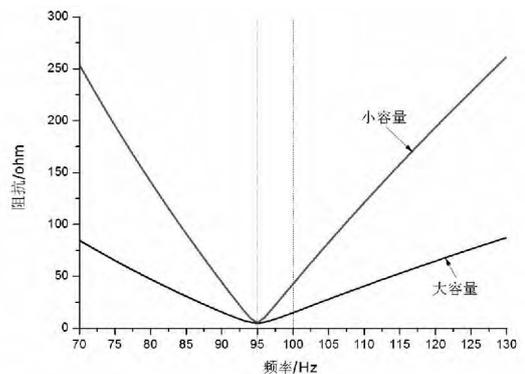


图 4 不同容量下 2 次谐波单调谐

滤波器的不同频率下的阻抗

图 4 所示是在两个不同容量的 2 次谐波单调谐

滤波器的不同频率下的阻抗。由图 4 可知,两个不同容量的滤波器在谐振频率下阻抗是相同的,但是由于滤波器设计起来有频差,因此两个滤波器的效果就会有所差异。如图可知,在相同频差的情况下,容量越小的滤波器其滤波效果就越差。

第二是电容上的压降。

由于滤波器的容量主要是通过滤波器上的电容值进行计算,因此在一定的谐波电流下,滤波器容量与电容器上的电压降落呈反比。这一点可以通过以下的推导表示。

假定滤波器母线上的电压为该电压等级的额定电压,则滤波器的容量可以通过式(1)进行计算。

$$Q = U_N^2 \omega C \quad (1)$$

当流过滤波器的谐波电流大小为  $I_h$ ,谐波角频率为  $\omega_h$  时,电容器上的压降为

$$U_c = \frac{I_h}{\omega_h C} \quad (2)$$

由此,可以得到

$$U_c = \frac{I_h}{\omega_h} \frac{U_N^2 \omega}{Q} = \frac{U_N^2 I_h}{nQ} \quad (3)$$

其中  $n$  为谐波次数。

由此可见,如果滤波器容量太小,那么电容器的额定电压就需要选择很大,从而抬高造价。

### 3 滤波器设计与效果

对 1.2 节所述工况中流进 11~12 线路的电流进行谐波分析,得到的结果如图 5 所示。由此可以发现,谐波中 3、4、5 次明显占优,同时也存在着少量的 2 次谐波。因此需要对 3、4、5 次谐波进行单调谐波滤波。

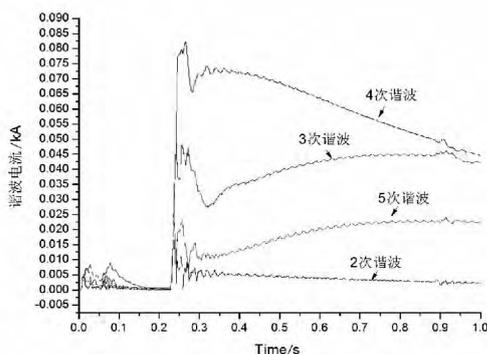


图 5 11~12 线路上电流谐波分布

根据每次谐波的最大值,分配滤波器各支路的容量。同时使得可以将滤波器总容量设计得接近并

小于 20 Mvar。

为了尽量保证每个滤波器上电容有类似的压降,设计了滤波器参数如表 1 所示。

表 1 滤波器参数设计

滤波次数	C	L	R
3	8.789 59E-06	0.118 891	4.0
4	2.109 5E-05	0.027 419	2.0
5	8.789 59E-06	0.043 181	3.0

当在 11 号母线 35 kV 侧采用如表 1 所示的滤波器,并投入 20 MVA 的低抗以维持稳态电压时,如发生 1 号母线对 550 MVA 空载变压器进行合闸操作,12 号母线 35 kV 侧三相电压瞬时值如图 6 所示。

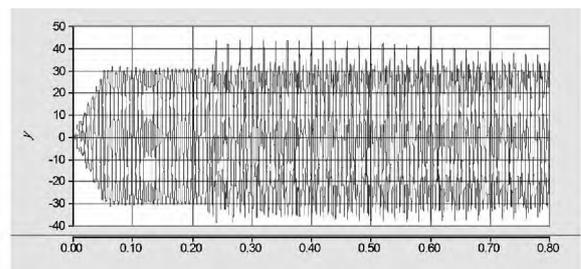


图 6 滤波器后石渠变电站 35 kV 电压瞬时值

对比图 2 与图 6 可知,采用设计的滤波器后 12 号母线的电压有了明显的好转,过电压情况得到较好的抑制。而对滤波器电容、电感上的压降进行仿真,可以得到仿真结果如图 7、图 8 所示。

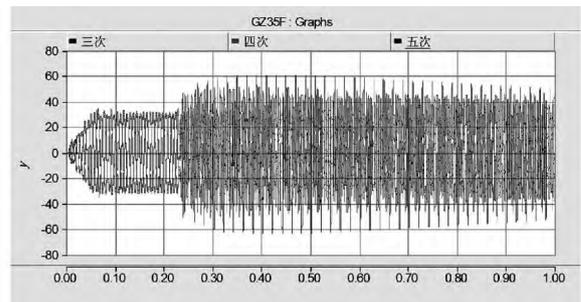


图 7 滤波器电容上的压降

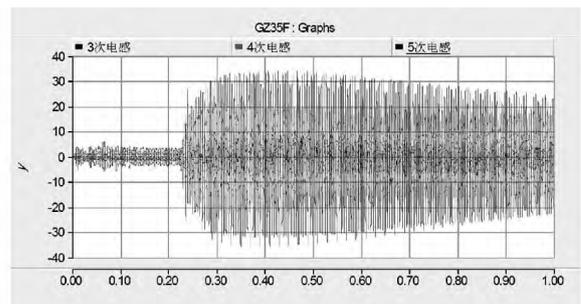


图 8 滤波器电感上的压降

由图 7、图 8 可知,在该仿真工况下,电容器上达到的最大峰值电压为 65 kV,电感为 35 kV,在选

型上必须比低容、低抗选择的额定电压要大。

#### 4 滤波器对孤网后高周高压风险的影响

由于滤波器的加入,在基频下增加了容性无功,虽然在基频情况下增加了低抗以抵消容性无功,但是当电网孤网情况频率升高后,低抗已经无法完全补偿电容,因此对孤网系统的高周高压风险可能有恶化作用。

另一方面,由于滤波器中增加了电阻性元件,增加了有功性负荷,故对高周高压风险也有抑制作用。

图 9 所示是在母线 8~母线 9 线路 N-2 后,有无滤波器两种情况下 11 号母线 220 kV 侧的电压有效值。

由图 9 可知,在增加如表 1 所示滤波器后,由于增加了容性元件,恶化了孤网系统的高周高压风险,系统电压在故障过程中有较为明显的增加,从而引发过电压保护。

为了抑制滤波器对自励磁的影响,需要考虑在高周以及基波高压时切除容性滤波装置。因此可以考虑以下两种途径。

方法 1: 高周切滤波器,整定方式与发电机相同。即在频率高于 51.5 Hz 时,延时 0.5 s 切除滤波器。

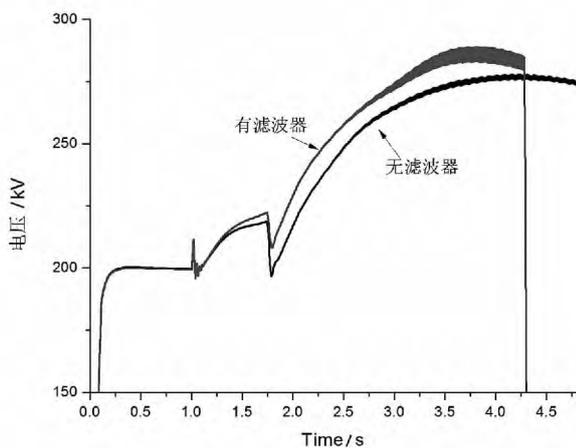


图 9 增加滤波器前后母线 8~母线 9 线路 N-2 故障中 11 号母线 35 kV 电压有效值

方法 2: 高压切滤波器。即在滤波器上配置灵敏度较高的基波过电压保护,如可设置为 1.2 p.u.,延时 0.5 s 切除变压器。

以上两种措施的效果如图 10 所示。

由图 10 可知,采用高周、高压两种策略均可以

较好地抑制滤波器对自励磁的恶化影响。同时可以

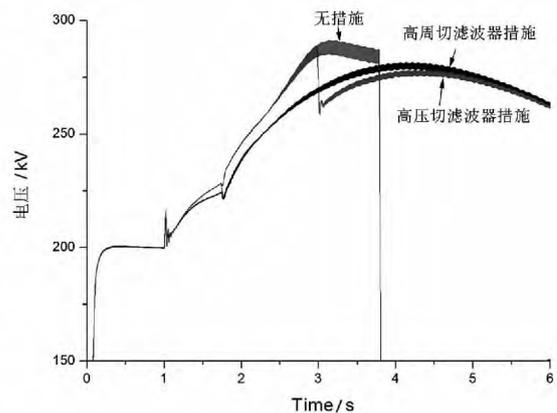


图 10 抑制措施效果图

发现高周策略由于启动时间较早,因此效果更为明显。

#### 5 结论

以西部某藏区电网为例,探讨了利用无源滤波器抑制励磁涌流引发谐波过电压风险的可行性,可以有以下结论。

1) 仿真结果表明,在弱联系电网中通过增加无源滤波器确实可以对励磁涌流引发谐波过电压风险进行有效的抑制。

2) 滤波器设计时滤波器的容量以及谐振频率十分关键。滤波器的容量决定了滤波器在有频差时的滤波效果同时也会影响一定谐波电流下电容器上的压降。滤波器容量越大,在相同频差下滤波效果越好,而在相同电流下电容的压降也越小。

3) 滤波器的谐振频率决定了滤波器在谐波下的无功特性,由于弱联系电网呈现容性状态,为了防止谐波放大,最好能够保证滤波器在谐波下也呈现容性阻抗,因此在弱联系地区中滤波器的调谐频率可能需要高于目标频率。

4) 滤波器对弱联系电网孤网运行后的高周高压风险的影响方面,一方面滤波器提供了容性功率恶化了电网孤网运行后的高周高压风险,另一方面滤波器上的电阻也增加了有功负荷有利于抑制该风险。但仿真结果表明,在装设无源滤波器后,当系统因故障孤网时,过电压的幅值往往会高于装设之前。

5) 采用高周、高压两种策略均可以较好地抑制滤波器对电网孤网运行后的高周高压风险的恶化影

(下转第 80 页)

因所导致的事故分析,主要从开关柜的运行维护、定期轮换、系统接地方式以及发电厂停电事故应急预案的良好执行等方面提出整改防治措施,避免类似事故的再次发生,尽可能保证全厂停电情况下的人员以及各类设备的安全。

1) 改善开关室及柜内运行环境:改善开关室及柜内运行环境,必要时在开关室内配置大功率除湿设备,安装空调。定期对开关室通风及除湿设备进行检查,特别是在雨季和霉雨气象情况下对室内设备除湿效果的监测和检查,确保开关室的通风及除湿设备运行正常。

加强开关柜的运行维护,当开关柜内断路器退出运行时,及时将该开关柜内的除湿加热装置投入运行。

2) 强化设备定期轮换制度:严格执行设备定期轮换制度,认真执行运行规程,确保设备安全可靠地投入运行,避免发生因某一设备长期处于备用状态而出现受潮、积污等降低设备绝缘水平的现象。

3) 完善 35 kV 系统运行方式:综合考虑发电厂运行环境以及设备运行维护情况,为避免再次发生类似系统谐振过电压事故,建议对该发电厂 35 kV 系统(不接地系统)的消弧设计方式进行修改,只保留经消弧线圈接地方式运行,取消消弧消谐装置。

4) 落实发电厂停电事故应急预案:为保证由于各种因素引发的全厂停电事故情况下的人员及设备安全,有必要从组织机构层面明确人员职责范围,定

(上接第13页)

响。同时可以发现高周策略由于启动时间较早,因此效果更为明显。

参考文献

[1] 周佩朋,项祖涛,杜宁,等. 西北 750 kV 电网合空变导致青藏直流闭锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 129 - 133.

[2] 种芝芝,粟小华,刘宝宏. 西北电网主变充电引起青藏直流闭锁的原因分析及对策[J]. 电力建设, 2013, 34(3): 88 - 91.

[3] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of Transformer Inrush Current by Controlled Switching —— Part 1: Theoretical Consideration [J]. IEEE Trans. on Power Delivery 2001, 16(2): 276 - 280.

[4] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of Trans-

former Inrush Current by Controlled Switching —— Part 2: Application and Performance Considerations [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2001, 16(2): 281 - 286.

4 结 语

35 kV 高压开关柜是发电厂的重要设备之一,其运行状态对发电厂乃至电力系统的安全可靠运行有着重大影响。

通过对这起 35 kV 开关柜绝缘缺陷导致主变压器开关跳闸引起全厂停电的事件原因进行分析,就开关柜运行维护、轮换制度、35 kV 系统接地方式以及发电厂停电事故应急预案的全面执行等方面提出整改及防治措施,供各发电厂作为参考,希望可以对预防类似事故再次发生起到一定的作用。

参考文献

[1] 戚永康. 浙江省火力发电厂厂用电高压开关柜事故分析[J]. 浙江电力, 1997(2): 6 - 10.

[2] 朱雪松. 几起典型的 220 kV 变电站 35 kV 开关柜故障及其防治对策[J]. 湖州师范学院学报, 2011(33): 217 - 219.

[3] 朱根良. 浅议中压开关柜事故调查中的故障分析[J]. 高压电器, 2002, 38(5): 62 - 63.

[4] 崔成恕,高华. 金属封闭开关设备的发展浅析[J]. 高压电器, 2003, 39(2): 18 - 22.

[5] 张聘,高丕俭. 防范全厂停电事故[J]. 电力安全技术, 2005(7): 44 - 45. (收稿日期: 2013 - 11 - 29)

former Inrush Current by Controlled Switching —— Part 2: Application and Performance Considerations [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2001, 16(2): 281 - 286.

[5] POVH D, SCHULTZ W. Analysis of Overvoltage Caused by Transformer Magnetizing Inrush Current [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(4): 1355 - 1365.

[6] 谢达伟,洪乃刚,傅鹏. 一种变压器空载合闸励磁涌流抑制技术的研究[J]. 电气应用, 2007, 26(3): 34 - 38.

作者简介:

滕予非(1984),博士,工程师,研究方向为电力系统及其新型输电的分析与控制;

汤凡(1983),硕士,助理工程师,研究方向为电力系统稳定与控制;

魏巍(1984),博士,工程师,研究方向为电力系统稳定与控制。(收稿日期: 2013 - 12 - 16)