

电气化铁道谐波抑制与无功补偿的最优计算

张巍,马文营,杨洪耕

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要: 首先分析了电铁谐波抑制和无功补偿的现有方法以及各个方法存在的优缺点,总结了它们之间的基本联系和需要考虑的多种因素。通过对实际工程的探索,针对电铁负荷这一特殊类型,从无源滤波器的基本设计入手,归纳出了综合考虑总投资等因素情况下,电气化铁道最优谐波抑制与无功补偿的计算方法,文章最后通过对实际工程进行仿真并对结果进行了分析,进一步确认了该方法的正确性和可行性。

关键词: 滤波器设计; 谐波抑制; 无功补偿; 电气化铁道; 数字仿真

中图分类号: TM922 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)08-0033-04

1 引言

谐波问题与无功功率问题对电力系统和电力用户都是非常重要的问题,也是近年来各方面关注的热点之一。谐波抑制和无功补偿是两个相对独立的问题,但是两者间的联系非常紧密:(1)存在谐波的情况下,无功功率的定义和谐波有密切的关系,谐波除本身的问题之外,也影响负载和电网的无功功率,影响功率因数。(2)产生谐波的装置同时也大都是消耗基波无功功率的装置,如各种电力电子装置、电弧炉和变压器等。(3)补偿谐波的装置通常也都是补偿基波无功功率的装置,如LC滤波器、有源电力滤波器中的许多类型都可以补偿无功功率。

电气化铁路具有速度快、运输能力强、供电距离长、节约能源与造价、牵引性能好等优点,因而具有广阔的发展前景,是世界以及我国铁路发展的方向。但是,由于电气化铁路的负荷特殊,所产生的谐波、负序不仅影响到电铁牵引站的供电可靠性,对当地电网的安全可靠运行也产生了十分不利的影

响。当前电铁谐波抑制的主要措施是在谐波源头加装LC调谐滤波器、静止无功补偿器(SVC)或是有源电力滤波装置(APF或SVG)。(1)无源滤波器装置,即由电力电容器、电抗器和电阻器适当组合而成的滤波装置。由于其结构简单、运行可靠、维护方便以及价格上的优势,得到了广泛的应用,但也有不少缺点:有效材料消耗大,体积大;滤波要求和无功补偿、调压要求有时难以协调;滤波效果不够理想,对系统运行状态较敏感;系统频率特性变化时,在某些条件下可能和系统发生谐振或产生谐波放大,引发事故。(2)静止无功补偿器虽然可以根据无功功率需求量自动进行补偿,适合抑制快速变化

的畸变负荷(如电力机车)所产生的电压波动和闪变,但是也必需注意它们自身所产生的谐波影响。(3)有源滤波器虽然在滤波效果、无功补偿效果、抑制电压波动及设备体积等方面都有较大优势,但是其投入实用的最大障碍是设备的高价格。

在电铁牵引变电所加装无源滤波器,不仅可以吸收谐波电流,而且也能提高功率因数和电压质量。滤波装置的设计要求是以最少的投资达到最佳的补偿与抑制效果。本文以西昌电气化铁道为例进行滤波器设计和仿真研究,提出了兼顾投资成本等多因素的电铁无源滤波分组投切最优补偿方案的计算方法。

2 基本设计方法

由于电铁负荷变化很大,在轻载时形成无功倒送(进相无功),电力管理部门对此一般采用反送正计功率因数计量,即按一段时期统计的平均无功(无功按绝对值相加)和平均有功的关系计算功率因数 $\cos \phi$ 。即:

$$\cos \phi = \frac{P_i}{\sqrt{(P_i)^2 + (|Q_i|)^2}}$$

通过公式可以看出,无功的减少直接导致功率因数的优化。按照最小二乘法,即当并联滤波器后的平均等效无功接近该电臂负荷的平均无功值,可以获得固定补偿下的最高功率因数。

现有的电气化铁道治理方案计算方法一般是以监测得到的实测数据,按预设的各可能方案(例如:固定无功补偿器、无源滤波器组分组投切+固定电抗器、无源滤波器组+固定电抗器分组投切等)分别计算滤波器参数以及进行结果的校验。因此整个设

计过程所需时间、方案接近最优的程度主要由方案的预设过程以及相关参数(滤波效果、总投资、设备安装等)的校验与比较来决定。虽然最终方案能达到设计要求,但不一定为最优结果。

根据各种经验模型(补偿方式等)模块的建立,可以由程序自动计算出所有最优组合,并且根据具体要求(是否设定评估权重)得到所需的方案(或方案列表)。根据今后的发展需要,程序只需要进行模块扩展就能满足最终输出的全面性。在此限于篇幅仅介绍补偿分段,兼顾总投资最小的最优投切计算方法,即把无源滤波器(或并联电抗器)进行分组,针对不同的分组情况,结合投切阈值与延迟时间,在满足滤波要求的基本条件下,通过程序自动寻求最优分组投切补偿方案。

按照无功补偿的要求,应使负荷的无功尽量由兼作无功补偿器的滤波器补偿。在工程实际中,应在负荷消耗的无功超过某些阈值时,利用开关进行无源滤波器的分组投切,分段补偿。但是在工程实现上存在一些约束条件:

(1) 由于滤波器只能按照各次滤波器的并联数进行分组,无法实现无级补偿。

(2) 如果对滤波器分组过多,虽然能提高补偿效果,增大功率因数,但是同时也增加了开关(在实际工程中,使用大功率电子开关器件,可以频繁投切)的数目,进一步增大了设备投资。

(3) 用作滤波器投切的开关的价格和使用寿命与投切次数密切相关。按照最优补偿效果,常常会出现开关投切过于频繁,造成使用寿命较短,长期投资增加。

(4) 进行分组投切的滤波器按照各次谐波的滤波要求设计,进行分组后,也必须满足滤波要求。

综合考虑以上约束,可以得到基于非线性规划的滤波器优化设计模块的数学描述:

$$\begin{cases} \max(f(SWM, T, m, P_i, Q_i)) \\ g(SWM, T, P_i, Q_i) < N \\ SWM \leq SW_{mn} \end{cases}$$

其中, $f(SWM, T, m, P_i, Q_i)$ 为满足滤波效果和开关投切次数限制进行潮流计算所得的反送正计功率因数的函数; $g(SWM, T, P_i, Q_i)$ 为投切次数的约束条件函数, T 是开关投入的延迟时间; N 为某时段所能接受的投切次数,由所采用的开关类型决定,所选定的最大阈值和开关延迟时间决定了开合次数,同时也影响功率因数,所以可以通过初步计算筛选

出满足开合次数的可能组合,减小计算量; m 是分组情况,根据不同工程设计要求,可以分为各次谐波滤波器内分组(如图1)、滤波器间组合分组(如下仿真实例)以及滤波器与并联电抗器分组等方式; n 为谐波的次数; P_i, Q_i 是负荷在一段时间内的无功与有功; SWM 为投切时采用的阈值,影响投切的最大阈值由滤波率决定; SW_{mn} 是某种分组情况下,滤波器投切的无功上限(最大阈值)。通过潮流的计算,对满足各项标准的寻优结果(可能有多组)按具体要求各项因素权重进行自动或人为评估。

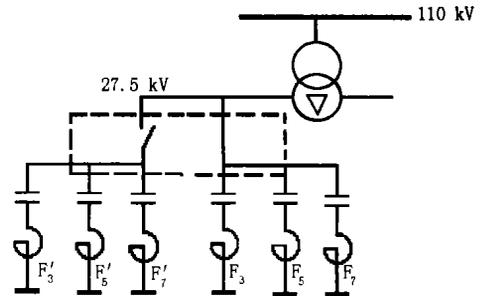


图1 滤波器分组(各次分组)投切接线图

Fig. 1 The schematic diagram of passive filter grouping

鉴于用户注入电网的谐波电流允许值是公共联接点三相数据。根据阻抗平衡型牵引变压器的接线方式和两相侧谐波电流的相位变化,两供电臂流入110 kV电力系统公共联接点三相的谐波电流计算式如下:

$$\begin{aligned} I_{Ah} &= \sqrt{(1 + \sqrt{3})^2 I_h^2 + (\sqrt{3} - 1)^2 I_h^2} / (2\sqrt{3} K_w) \\ I_{Bh} &= \sqrt{I_h^2 + I_h^2} / (\sqrt{3} K_w) \\ I_{Ch} &= \sqrt{(\sqrt{3} - 1)^2 I_h^2 + (1 + \sqrt{3})^2 I_h^2} / (2\sqrt{3} K_w) \end{aligned}$$

其中: $K_w = \frac{110}{27.5\sqrt{2}}$ 。

假设 A 臂、B 臂谐波电流仍能满足 90° 相位条件。 I_{Ah}, I_{Bh} 分别表示两供电臂的第 h 次谐波电流。牵引变压器三相侧注入系统的谐波电流不超过国际允许值 $I_{h允许}$, 亦即:

$$I_{Ah} \leq I_{h允许}; \quad I_{Bh} \leq I_{h允许}; \quad I_{Ch} \leq I_{h允许}$$

对于三相的谐波电流计算式,有

$$I_{Ah}^2 + I_{Bh}^2 + I_{Ch}^2 = (I_h^2 + I_h^2) / K_w^2 = 3 I_{h允许}^2$$

由二次不等式性质可知,在 I_{Ah} 与 I_{Bh} 的代数和为定值时,滤波后使 $I_{Ah} = I_{Bh}$ 时三相侧注入系统谐波电流相等且最小。即

$$I_{Ah} = I_{Bh} = I_{Ch} = \frac{\sqrt{2} I_h}{\sqrt{3} K_w} = \frac{\sqrt{2} I_h}{\sqrt{3} K_w} \leq I_{h允许}$$

因此,对于阻抗匹配平衡变压器而言,滤波后应使

$I_h = I_h \cdot 2\sqrt{3} I_{h\text{允许}}$,相应的最大无功阈值为:

$$SW_{mn} = 2\sqrt{3} \times \frac{I_n \times U \times \sqrt{1 - \cos^2}}{(1 - m_n) \times HRI_n}$$

$$m_n = \frac{\sum \left[\frac{1 + Z_C/Z_S}{1 - \frac{m_{\text{总}}}{m} \times \frac{Z_C}{Z_S}} \right]}$$

其中, I_n 是各次谐波在变压器高压侧的电流限值, U 是低压侧额定电压, m_n 是某种分组情况下对 n 次谐波电流的分流比, HRI_n 是 n 次谐波的电流含有率, Z_S 是系统的阻抗, Z_C 是已投入的分组无源滤波器的阻抗。

3 电铁谐波治理中的仿真

鉴于西昌地区处于四川电网的末端,而且无大的电源点,与主网的联系非常薄弱。附近的电源支撑点由于装机容量较小,因此不足以支持该地区内的负荷,电网的短路容量也较小。由于上述原因,电铁投运后所产生的谐波、闪变、波动以及不平衡等问题十分突出。西昌电网担负西昌卫星发射基地等重

要负荷的供电任务,西昌电网的电能质量问题给电网的安全运行以及重要负荷—西昌卫星发射中心的可靠优质供电造成了极大的威胁。

针对西昌电铁的实际运行情况,以泸沽牵引变电所为仿真对象。仿真设计的基本要求如下:

(1) 至少具有 3、5、7 次谐波滤波功能,使牵引变电所注入电网的谐波电流达到国家标准的要求。

(2) 在公共联接点处由牵引变电所负荷波动造成的电压波动和闪变达到国家标准及三相不平衡的要求。

(3) 公共联接点处 110 kV 母线电压控制在 106.7 ~ 117.7 kV 之间,牵引变电所 27.5 kV 母线电压不超过 29 kV。

(4) 保证在各种运行方式下不发生谐波放大及谐振。各滤波支路的电流、电压、容量校核应符合有关国家标准。

通过计算并比较可知:

(1) 如果使用无源滤波器组+固定电抗器补偿方案(不分组投切),最大功率因数不能满足补偿要求($\cos < 0.9$) (计算结果如表 1)。

表 1 滤波器分组计算结果

Tab. 1 The computing result of filter design

	分组一	分组二	分组三	无源滤波器组+固定电抗器
最大电压不平衡度/%	3.45	3.45	3.45	3.61
95%电压不平衡度/%	1.64	1.61	1.61	1.75
最高/最低电压/kV	115.8/109.7	115.8/109.7	115.8/109.7	115.6/108.1
瞬时最大倒送无功/Mvar	4.26	2.098	1.88	2.95
平均倒送无功/Mvar	1.07	0.38	0.5	1.16
平均无功/Mvar	1.73	0.84	1.26	2.39
PCC 平均视在功率/MVA	4.41	4.23	4.25	—
平均功率因数	0.92	0.96	0.955	0.86 (<0.9, 不符合基本要求)
开关投切次数(5min 延时)	94/106	106/132	132/106	—
总投资/万元	298	342	304	—

(2) 如采用有源滤波器方案,投资将大大超出。

(3) 采用滤波器分组投切寻优算法,预先设定各相关标准以及总投资等相关因素的权重(也可根据输出的各类最优结果综合考虑)。为满足频繁投切,使用真空开关(VBM34 kV 600 A),同时采用延时投切的方法。两臂实测的平均无功分别为 1.1 Mvar 和 1.6 Mvar。考虑根据滤波要求(只考虑 3、5、7 次谐

波)可以计算出满足谐振点以及滤波率的各次滤波器串并联数(表 2)。对于电铁负荷,当有机车通过时,无功与负荷电流较大,且基本维持在一定的高负荷水平;而线路上无车辆运行时则无功与谐波水平很低。按照以上分析,只需在较高负荷(无功)水平时投入全部滤波器,在低负荷时投入部分滤波器。考虑工程实际安装及控制,3、5、7 次滤波器组内不

再拆分,只进行简单的组合分组;结合滤波器分组情况和并联电抗器部分的等效无功值确定投切区间,最后根据选定的步长在寻优计算过程中作为每种分组情况下的补偿调节,以决定最优分组投切状态。

表2 滤波器设计参数

Tab.2 The Parameter of filter design

供电臂侧(27.5 kV) 系统等值阻抗/		11.18			
牵引变压器类型		阻抗匹配平衡变压器 110/27.5 kV			
容量		2 ×20 MVA			
内容		基波	3次	5次	7次
臂	电流/A	341	62.3	24.2	12.1
	电容串联 ×并联数		3 ×11	3 ×4	3 ×2
	电感/mH		107.32	106.43	108.24
	电阻/		2	2.36	2.95
臂	电流/A	502	74.9	29.0	14.5
	电容串联 ×并联数		3 ×13	3 ×4	3 ×2
	电感/mH		90.81	106.43	108.24
	电阻/		1.7	2.36	2.95
电容器型号 :BFM10.5 kV-100 kvar-2.887 μF-1 W					

在此列举计算过程中三种分组方式的结果,如表1所示。

(1) 固定无源滤波器 + 并联电抗器(两级):3、5、7次滤波器同时投入后,仅根据应补偿的无功电流决定并联电抗器是否投入。臂和臂并联电抗器分别为2.9 Mvar和2.6 Mvar(使两臂等效无功达到其实际平均无功水平)。可形成两种补偿量:臂1.1 Mvar和4 Mvar;臂1.6 Mvar和4.3 Mvar。总共使用4个VBM。

(2) 固定无源滤波器 + 并联电抗器(三级):3次与5次、7次滤波器同时投入;3次与5次、7次滤波器与并联电抗器同时投入;3次滤波器和并联电抗器同时投入。臂和臂的并联电抗都是2.3 Mvar(3次滤波器和电抗器并联后仍呈进相无功)。可形成三种补偿量:臂0.3 Mvar、1.7 Mvar、4 Mvar;臂0.6 Mvar、2.1 Mvar、4.3 Mvar。总共使用6个VBM,并联电抗器一拆为二,增加20万元,真空开关增加24万元。

(3) 并联电抗器分拆为两个,分别为1 Mvar和2.5 Mvar。相应可形成四种无功补偿量:臂0.5 Mvar、1.5 Mvar、3 Mvar、4 Mvar,臂0.8 Mvar、1.8 Mvar、3.3 Mvar、4.3 Mvar。比起(1)增加6万元

(增加了电抗器容量1.5 Mvar)。

通过前述的计算方法寻优,各分组情况下投切时间为5 min时结果较佳。从结果来看,分组一仅控制并联电抗器开断最为简单,且投资费用最低。平均功率因数0.92,满足功率因数要求,通过对滤波效果等相关参数的校验,满足要求。在真空开关投切的过程中,滤波器接入方式不变,所以不影响对谐波的滤波效果。分组二通过改变3、5与7次以及电抗器之间的并联组合关系来改善功率因数和无功倒送情况,可取得0.96的平均功率因数。瞬时最大倒送无功下降到2 Mvar,但是在滤波器分组投切过程中,在只有3次滤波器接入时,注入系统的5、7次谐波可能超出允许值。分组三不改变滤波器接入方式,由两组电抗器来控制无功补偿量,故平均功率因数可达0.955,瞬时最大无功倒送减小到1.88 Mvar,且不改变对谐波的滤波效果,但是由于增加开关并将电抗器拆分增加了投资。

采用无源滤波器 + 并联电抗器分组投切可改善牵引变电所平均功率因数,满足考核要求,减少容性无功倒送量。采用两牵引臂各一个真空开关控制并联电抗器投切、滤波器组始终保持接入的方式,控制简单,且不影响开关切换前后的谐波抑制问题。需要注意的是真空开关应在电流过零相位断开,以减少反电势对开关的影响。

4 结束语

本文针对电气化铁道的谐波抑制和无功补偿问题进行分析,提出了在满足滤波要求和无功补偿要求的基础上,以投资最小为优化目标,基于非线性规划的滤波器优化设计方法。文中通过对西昌地区泸沽牵引变电站进行仿真研究,验证了方案的正确性与可行性。

参考文献:

- [1] 吴竟昌. 供电系统谐波(第一版)[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [2] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [3] Yang H, Pirote P, de Jaeger E, et al. Harmonic Emission Level of Industrial Loads-Statistical Assessment[C]. CIGRE, 1996, 36-306.
- [4] Kazibwe W E, Ortmeier T H, Hamman M S A A. Summation of Probabilistic Harmonic Vectors[J], IEEE Trans on PWRD 1989, 4(1):621-628.

(下转第39页)

可大大有助于系统事故分析,提高继电保护专业的管理水平,使河南省继电保护事故检验及管理工步入标准化、规范化、网络化进程。

参考文献:

- [1] 汪源生. 基于 WEB 技术的电力技术监督管理信息系统设计与开发[J]. 电力系统自动化,2001,25(1):64-66.

收稿日期: 2003-01-06; 修回日期: 2003-05-16

作者简介:

郭耀珠(1964-),女,硕士,高级工程师,主要从事继电保护专业工作;

龙明(1960-),男,硕士,高级工程师,主要从事计算机网络工程;

石光(1971-),男,学士,工程师,主要从事继电保护专业工作。

Intranet-based fault testing and management information system for microprocessor-based protective equipments

GUO Yao-zhu, LONG Ming, SHI Guang, NIU Shuang-xia

(Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: This paper presents a method of fault testing and management for microprocessor based relay protective equipments. The system uses the relay protection testing device to test the microprocessor based relay protection equipments, produces the testing report automatically and releases the testing report on the Internet. On the base of advanced computer technology, swift internet technology and the using of Buower/Server network structure, the system features in real and reliable fault testing results and convenient and flexible use and maintenance. It is very helpful for fault analysis of power system and can make the relay protection testing work towards standardization.

Key words: relay protection; fault testing; management information system; Intranet

(上接第 36 页)

- [5] IEC 6100 - 3 - 6,1996. Electromagnetic Comnetibility Limits Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systmes[S].

张巍(1978-),男,硕士研究生,从事电能质量监测治理及电力系统计算机应用研究;

马文营(1977-),男,硕士研究生,从事电能质量监测治理及电力系统计算机应用研究;

杨洪耕(1949-),男,院教授,从事电能质量监测治理及电力系统计算机应用研究。

收稿日期: 2002-08-19; 修回日期: 2002-10-15

作者简介:

The optimal calculation of harmonic control and reactive power compensation in electrification rail way

ZHANG Wei, MA Weir-ying, YANG Hong-geng

(College of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The paper mentions briefly present methods of harmonic control and reactive power compensation and their advantage and short age, and it describes the relation between harmonic control and reactive power compensation and some factors in consideration. Aiming at the electrization railway, it outlines the mathematical model of the optimal calculation method of passive filers grouping including various factor(for example, total cost). With summarizing the project applicaton, the optimal calculation method of harmonic control and reactive compensation is established. At last, through the study on simulation the correctness and feasibility of the method is further confirmed.

Key words: filter design; harmonic control; electrization railway; digital simulation