

新型动态无功补偿装置在牵引变电所应用

智慧,李群湛,周福林

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 针对牵引变电所固定的并联电容补偿装置不能动态地补偿牵引负荷随机波动的感性无功缺陷,提出了一种新型动态无功补偿装置设计,即通过调节降压变压器低压侧的母线电压,使无功补偿装置的补偿容量随负荷动态变化,在反送正计的无功功率计量方式下,使牵引变电所的无功功率电度最小,平均功率因数高于 0.9。进而提出了 3 次固定滤波器(FIX)+3 次可调滤波器(TC3+TL3)补偿方案,配置最佳补偿支路参数,以期达到无功、负序、谐波综合治理的目的。通过分析其技术指标和经济性能,验证了该方案的有效性。

关键词: 牵引变电所; 动态补偿; 无功; 负序; 谐波

中图分类号: TM 631;TM 714.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6047(2006)11-0071-04

0 引言

电力牵引作为电力系统的一级负荷,其独特的工作特性给电力系统及其自身造成了诸多不良影响。功率因数低、负序功率大、谐波含量高,是牵引供电系统的技术问题,它不仅使牵引供电系统自身的技术指标恶化,也影响了电力系统的电能质量,因此需要在牵引供电系统中采用新技术、新措施,以期得到综合解决^[1]。

并联补偿就是具有这种综合作用的技术措施,其中并联无功补偿允许在牵引变电所相异端口同时使用并联电抗器和并联电容器,在实际应用中,还常常在并联电容器中串入适量的电抗器,或者由此构成专门的滤波通路,即兼作滤波装置,或者用以防止谐波放大,确保装置安全运行。

我国牵引变电所一般采用固定容量并联无功补偿^[2],它能满足无功电量反送反计或反送不计方式下的变电所功率因数要求。但是,由于补偿装置不可调,实际运行中不可避免地存在无功的欠补和过补 2 种工作状态^[3],无法解决无功功率的过补偿和欠补偿问题。在现行的无功电量反送正计计量方式下,固定补偿方式难以满足变电所功率因数指标要求,甚至出现负面影响。

据此,本文提出了一种新型动态无功补偿装置设计,通过改变无功功率和负序功率的分布方式,改善系统的技术指标和经济性能,而且经济效益的取得主要来自因功率因数的提高而减少的罚款^[1]。并以某牵引变电所一天的实测运行数据为设计的基础,制定降压变压器分级方案和投切控制策略,通过计算机仿真运行,对这种新型动态无功补偿装置进行性能分析,验证方案的有效性。

1 补偿方案

结合国外的先进技术,我国电气化铁道变电所无功补偿与谐波综合治理提出了多种方案^[4-5],无论哪种方案,都是力求基波下补偿牵引负荷的感性无功功率,提高功率因数,并滤除(或抵消)指定谐波。

根据具体变电所的实际负荷和谐波情况进行方案组合^[6],对于谐波较严重的变电所,从滤波的安全性和有效性出发,采用固定的多次单调谐滤波器(FIX),滤波支路可根据需要采用 3 次、3 次、5 次、或 3 次、5 次、7 次滤波器;可调电容器组支路(TC)和可调电抗器支路(TL)用于调节无功,由变电所无功负荷状况决定采用 TC 或 TL 或两者同时采用,通过晶闸管开关的有载分合和控制加在电容器组支路(TC)和电抗器支路(TL)上的电压来控制其补偿电流;降压变压器采用多抽头的调压变压器,通过改变调压变压器的低压侧抽头的位置(改变分接开关的级数),改变电容器组支路和电抗器支路的外施电压,使无功补偿装置的补偿容量能随负荷动态变化,在反送正计的无功功率计量方式下,使牵引变电所的无功功率电度最小,平均功率因数高于 0.90。对于谐波不是非常严重而以提高功率因数为主的变电所,还可以在此方案基础上进一步简化,省掉固定滤波支路。原理如图 1 所示。

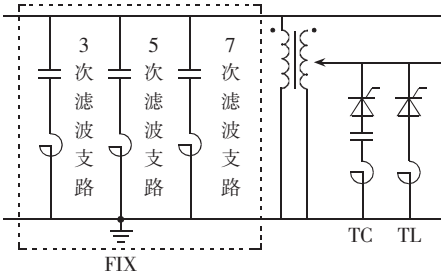


图 1 FIX+TC+TL 原理图

Fig.1 Principle of FIX+TC+TL

2 新型动态无功补偿装置设计

2.1 几个定义

电气化铁道牵引变电所采用以提高功率因数为主要的并联补偿装置,设置在两牵引负荷端口兼作补偿滤波器,它是由 $C-L$ 串联电路组成,在基波下呈容性,在 n 次谐波下,合理设计无功补偿装置串并联电容器组和电感的大小,使牵引负荷谐波经过该通路分流,减少进入系统的谐波电流,实现无功、负序和谐波的综合治理^[1,7-8]。

其综合补偿特性分析如下,负荷端口的 3、5、7 次滤波器等效滤波回路如图 2 所示。

现假设: I_n 为指定端口负荷基波电流及 n 次谐波电流(模值); I_R 为指定端口的基波无功补偿电流(模值); $I_e^{(-)}$ 为合成负序电流平均有效值; Z_{Sn} 、 I_{Sn} 分别为从端口向电力系统看进的 n 次谐波阻抗与流入的谐波电流(模值); Z_{Fn} 、 I_{Fn} 分别为(单调谐)补偿支路的 n 次谐波阻抗与流入的谐波电流(模值)。

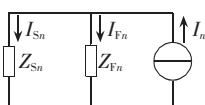


图 2 负荷端口的谐波等效回路

Fig.2 Equivalent loops of harmonics at load port

定义 1 调谐系数 t_n , 它为 n 次单调谐补偿支路基波感抗 $X_L^{(n)}$ 与容抗 $X_C^{(n)}$ 之比, 也称电抗率。且考虑到设备制造安装、运行误差和电网频率偏移等综合偏差因子, 也称综合频偏 δf (一般 $\delta f > 1\%$), 则

$$t_n = \frac{X_L^{(n)}}{X_C^{(n)}} \geq \frac{1}{n^2(1-\delta f)^2} \quad (1)$$

定义 2 滤波支路的滤波率(分流率)

$$d_n = \left| \frac{Z_{Sn}}{Z_{Sn} + Z_{Fn}} \right| \quad (2)$$

定义 3 指定端口的相对无功补偿量

$$\beta = I_R / I = Q / S \quad (3)$$

式中 $Q = U_{BB} I_R$ 为基波补偿容量; $S = U_{BB} I$ 为指定端口的牵引负荷总容量。

定义 4 负序电压不平衡度

$$\alpha_U = U_e^{(-)} / U_{BB} \quad (4)$$

式中 $U_e^{(-)} = X_S I_e^{(-)}$ 为牵引侧 Δ 绕组平均有效负序电压。

2.2 补偿支路参数配置方案

若端口的滤波支路为基波容性, 则其中电容器组基波容抗为

$$X_C^{(n)} = \frac{1}{1-t_n} \frac{U_{BB}}{\beta} \quad (5)$$

串联电抗器基波感抗为

$$X_L^{(n)} = \frac{t_n}{1-t_n} \frac{U_{BB}}{\beta} \quad (6)$$

为方便, 在偏调谐时可不计滤波回路的电阻, 即

$$Z_{Fn} = jX_{Fn} = jX_C^{(n)}(nt_n - 1/n)$$

当谐波次数较低($n \leq 7$)时, 可认为 $Z_{Sn} = jX_{Sn} = jnX_S$,

但个别情况例外, 要由实测数据确定, 在满足式(1)以使 Z_{Fn} 、 Z_{Sn} 均为感性, 即不致使谐波放大情况下, 由式(2)展开可得:

$$d_n = (1 + \frac{t_n - n^{-2}}{1 - t_n} \frac{U_{BB}}{\beta X_S})^{-1} \quad (7)$$

式中 X_S 为系统(基波)短路电抗。

2.3 降压调压变压器变比的确定

为了补偿无功和负序的方便, 降压变压器变比按补偿容量线性分级。补偿装置的最大补偿容量为

$$Q_{\max} = U_{BB}^2 / (n_{\min}^2 X) \quad (8)$$

式中 U_{BB} 为牵引变压器低压侧母线电压, 取值为 27.5 kV; $n_{\min}$ 为电压等效变比最小值 1; X 为补偿支路等效电抗。

假设降压变压器低压侧抽头分 5 为级可调, 令 $Q_{cn} = U_{BB}^2 / (n_d^2 X) = mQ_{\max}$, $m = 1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 5/5$, 从而可达到补偿容量线性分级的目的, 得:

$$n_d = n_{\min} / \sqrt{m} \quad (9)$$

式中 n_d 为电压等效变比; m 为容量等效变比。

可得调压变压器抽头在不同等级下的容量和电压等效变比如表 1 所示。

表 1 等效变比和对应电压

Tab.1 Equivalent ratios and corresponding voltages

抽头等级	m	n_d	u / kV
一级	1/5	$\sqrt{1/5}$	12.30
二级	2/5	$\sqrt{2/5}$	17.39
三级	3/5	$\sqrt{3/5}$	21.30
四级	4/5	$\sqrt{4/5}$	24.60
五级	5/5	$\sqrt{5/5}$	27.50

2.4 降压调压变压器低压侧抽头控制策略

主要参数: n 为降压变压器低压侧电压等级, $Q_x = Q_{cn} - Q_{\text{need}}$ 为需要补偿的无功功率, $\Delta Q = Q_{\max} / 5$ 为变压器每级无功补偿大小, i 为数据采样点(以一天 24 h 计, 每 3 s 采样一次), t 为换档标志位, 若变压器低压侧抽头换档则 $t=1$, 否则 $t=0$ 。

变压器换档策略: 换档延时过程中晶闸管断开, 无补偿。2 次换档之间有延时, 主要是受分接开关特性限制。其控制策略流程图如图 3 所示。

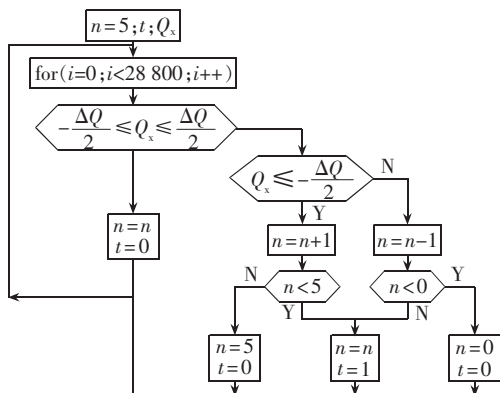


图 3 变压器控制策略流程图

Fig.3 Flowchart of transformer control strategy

3 补偿装置性能分析

3.1 实际补偿装置参数配置

现采用新型牵引变电所无功补偿方案,以某牵引变电所实际参数和实测数据为基础进行补偿。设计中采用额定容量为 100 kvar,额定电压为 10.5 kV 的单台电容器。

设补偿支路综合频偏 $\delta f=0.02$,现以 3 次谐波为例,调协系数 t_3 为 0.12。经过计算及反复尝试,在使功率因数达到要求且补偿容量最经济的条件下,确定实际补偿装置参数如表 2 所示。

表 2 参数列表
Tab.2 Parameter list

补偿支路		n_1	n_2	X_C/Ω	X_L/Ω
固定滤波支路 (FIX3)	a 相	4	3	1470.0	176.4
	b 相	4	4	1102.5	132.3
可调电容器组 支路(TC3)	a 相	4	4	1102.5	132.3
	b 相	4	6	735.0	88.2
可调电抗器支 路(TL3)	a 相				1293.6
	b 相				970.2

注:表中数据均归算至 27.5 kV 侧; n_1 、 n_2 分别为串、并联电容器数。

3.2 无功补偿

无功功率的影响主要体现在以下几个方面:

- a. 额外占有供、变电设备的容量,使其容量的有效利用率下降;
- b. 增大了电能损失;
- c. 额外增加了用户用电点的电压损失。

在现行的无功电量反送正计计量方式下,固定补偿方式难以满足变电所功率因数指标要求,甚至出现负面影响。根据电力系统对电气化铁路负荷无功电量的计量方式、电力牵引负荷自身特性以及电力电子技术的发展趋势^[11],在电气化铁道牵引供电系统中安装可调并联电容补偿已成为必然。

新型动态无功补偿装置的补偿容量能随负荷动态变化,当牵引负荷空载或较小,机车产生的感性无功小于或等于固定补偿装置补偿的容性无功即“过补偿”时,投入可调补偿装置电抗器调压。当牵引负荷较大,机车产生的感性无功大于固定无功补偿装置补偿的容性无功即“欠补偿”时,分级调节并联电容器组的端电压,使其输出适量的感性无功,实现无功大致平衡。

现以某牵引变电所实测数据为依托,参数配置如表 2 所示,采用新型牵引变电所无功补偿方案补偿后 a 相的功率因数由原来的 0.779 提高到 0.907,平均无功功率也由原来的 1 046.09 kvar 降低到了 614.53 kvar,无功补偿量达到了 58.04 %。方案补偿后与无补偿时的无功功率曲线如图 4 所示(图中虚线为无补偿,实线为补偿后)。

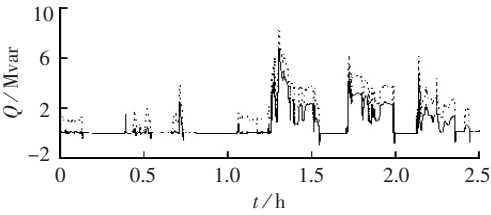


图 4 补偿后与无补偿时 a 相无功功率曲线
Fig.4 Var curves of phase a with and without compensation

3.3 负序补偿

负序的影响主要体现在以下几个方面:

- a. 使电机产生附加发热,引起 2 倍频的附加振动力矩;
- b. 将引起负序分量为启动元件的多种保护发生误动作;
- c. 电压不平衡使换流设备产生附加的谐波电流(非特征谐波)。

新型动态无功补偿装置在补偿无功的同时还有效地补偿了负序,负序电流平均有效值由原来的 27.22 A 下降到了 17.43 A,负序电压不平衡度最大值也由原来的 5.86 %下降到了 3.95 %,满足国标要求(最大值不超过 4 %)。方案补偿后与无补偿时的负序电压不平衡度曲线如图 5 所示。

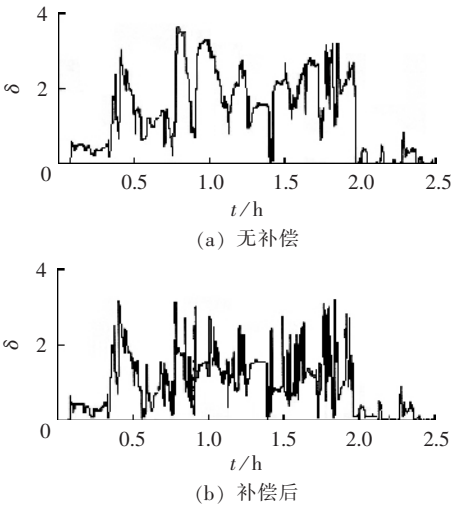


图 5 补偿后与无补偿时负序电压不平衡度曲线
Fig.5 Imbalance rate curves of negative sequence voltage with and without compensation

3.4 谐波^[4]

谐波的危害主要体现在以下几个方面:

- a. 使电力系统的继电保护和自动装置产生误动和拒动;
 - b. 使各种电气设备产生附加损耗和发热,使电机产生机械振动和噪声;
 - c. 对周围的通信系统产生干扰;
 - d. 增加了电网中发生谐波谐振的可能。
- 新型动态无功补偿装置安装在两牵引负荷端口

兼作补偿滤波器,在补偿无功的同时有效滤波,3 次谐波滤波率达到了 64.3 %。方案滤波后与无滤波时的谐波电流曲线如图 6 所示(图中虚线为无滤波,实线为滤波后)。

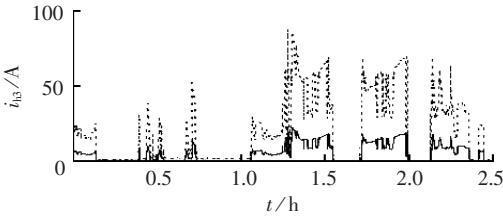


图 6 滤波后与无滤波时 a 相 3 次谐波电流曲线
Fig.6 The third harmonic current curves of phase a with and without filtering

3.5 经济效益分析

电力工业部《供电营业规则》第 41 条规定:无功电力应就地平衡。用户在提高用电自然功率因数的基础上,按有关标准设计和安装无功补偿设备,并做到随无功和电压变动时投入或切除,防止无功电力倒送。用户在当地供电企业规定的用电高峰负荷时,100 kV·A 及其以上高压供电的用户功率因数为 0.90 以上,并实行利率调整电价。即功率因数每低于规定值 0.01,给予当月运营电费 0.5 % 的罚金,每高于规定值 0.01,给予当月运营电费 0.15 % 的奖励,奖励系数最高为 0.75 %。并且电力系统为限制牵引变电所取用和注入无功负荷,无功电量采用“反供正计”的计量方式,按绝对值相加计算无功电量,这样给一些设有固定无功补偿装置的用户增加了工作难度。因为无功负荷大于补偿用量的欠补状态和小于补偿容量的过补状态,均会造成无功累加电量增大,严重时会引起功率因数大幅度跌落、运营电费加价、成本增加的不良后果[3]。

因此,牵引变电所的并联补偿系统像其他设备一样,其取舍及其采用的方式取决于技术指标和经济性能的综合考虑。虽然,技术指标通常是较为关键的,但是工程上对经济性能的要求也较为迫切,特别是技术指标已基本满足要求时,经济性能则成为决策的主要依据。本文采用新型动态无功补偿装置,动态补偿无功功率,有效地避免了“过补偿”和“欠补偿”的发生,经济效益的取得主要来源于功率因数的提高而减少的罚款,但以投入并联补偿为代价,总的经济效益可用并联补偿系统的回收年来表征^[1],即

回收年=
$$\frac{\text{并联补偿系统一次投资(元)}}{\text{因补偿所带来的年收益(元)}} \tag{9}$$

按两部电价制,在本文中电量电费的价格设为 0.5 元/(kW·h),基本电费价格为 12 元/(kV·A·月),补偿装置成套安装费用根据实际需要估计,可得补偿装置的投资估算如表 3 所示。

根据参考文献[6]计算可得每年因功率因数提高而产生的经济效益为 98.11×10⁴ 元,由式(9)可得并联补偿系统的回收年约为 3.49 年,总的经济效益还是很可观的。

表 3 FIX+TC+TL 投资估算
Tab.3 Estimation of FIX+TC+TL investment

序号	符号/名称	单价/10 ⁴ 元	单位	数量	合计/10 ⁴ 元
1	Tr1/调压变压器	60.0	台	2	120.0
2	FK/分接开关	12.0	台	2	24.0
3	1QF/真空断路器	3.0	台	4	12.0
4	2~5QS/单极隔离开关	0.6	组	4	2.4
5	2~5TA/电流互感器	0.3	台	4	1.2
6	C/成套电容器组	40 元/kvar	组	6.8 Mvar	27.2
7	CL/串联电抗器	5.0	组	6	30.0
8	SCR/晶闸管开关	22.0	组	4	88.0
9	TV1~2/放电线圈	0.3	台	2	0.6
10	保护屏	6.0	面	1	6.0
11	控制屏	6.0	面	1	6.0
12	测控系统	25.0	台	1	25.0
总计					342.4×10 ⁴ 元

4 结论

电气化铁道的负序、谐波与无功同时存在,新型动态无功补偿装置应用于牵引变电所,将补偿支路参数作了合理的配置,达到了综合治理无功、负序、谐波的目的,所以装置设计是成功的。新型动态无功补偿装置应用于牵引变电所,以尽可能地改善技术指标为基础,降低网损和额外占有的设备容量及提高系统设备电力输送能力来取得经济效益,但却以自身投入为代价,所以并联补偿装置的取舍及类型选择须从技术指标和经济指标综合考虑。

参考文献:

[1] 李群湛. 电气化铁道并联补偿装置及应用[J]. 北京:中国铁道出版社,1993.

[2] 贺建闽. 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 Jian - min. Evaluation of the effectiveness of the fixed parallel capacitor compensation used in traction substation[J]. Journal of the China Railway Society,2004,26(3):41-45.

[3] 赵秀玲. 动态无功补偿装置在牵引变电所的应用[J]. 铁道机车车辆,2002(5):59-60.
ZHAO Xiu - ling. Application of dynamic reactive power compensator in traction substation[J]. Railway Locomotive & Car, 2002(5):59-60.

[4] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1999.

[5] 贺建闽. 牵引变电所功率因数及其补偿措施研究[J]. 铁道学报,1997,19(3):116-120.
HE Jian-min. Study of power factor and its compensation method in traction substations[J]. Journal of the China Railway Society, 1997,19(3):116-120.

[6] 马庆安. 一种反馈式无功补偿方案及其应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2003.
MA Qing-an. Study on a feedback reactive power compensator and its application[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2003.

[7] 马庆安. 新型无功补偿装置的滤波能力分析[J]. 机车电传动, 2003(2):15-17.
MA Qing - an. Analysis on filter performance of novel reactive compensator[J]. Electric Drive for Locomotives,2003(2):15-17.

[8] 张丽. 无功反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):34-38.

[9] ZHANG Li. On the fixed compensation capacity optimize under the reactive power absolute measurement[J]. Journal of the China Railway Society,2003,25(2):34-38.

[9] 靳龙章. 电网无功补偿实用技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

(上接第 74 页 continued from page 74)

[10] 朱罡. 电力系统静止无功补偿技术的现状及发展[J]. 电力电容器, 2001(4):31-34.
ZHU Gang. Present status and development of static var compensation technology in power system [J]. Power Capacitors, 2001(4):31-34.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

智慧(1981-),女,河北元氏人,硕士研究生,主要从事

电力系统无功补偿和谐波建模方面的研究(E-mail:zhihui421@163.com);

李群湛(1957-),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统与牵引供电系统的综合补偿及优化设计、负荷及行为过程仿真、三相不对称非线性负荷的谐波分布及对策等方面的教学与科研工作;

周福林(1982-),男,四川广安人,硕士研究生,主要从事电力系统和机车建模方面的研究。

Application of dynamical var compensator in traction substation

ZHI Hui,LI Qun-zhan,ZHOU Fu-lin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Regarding to the fact that the fixed parallel capacitor compensator in traction substations cannot dynamically compensate the random fluctuating inductive reactive power, a novel var compensator is put forward, which varies compensative capacity dynamically according to the load by regulating the secondary side voltage of step-down transformer. Under absolute measurement mode, the reactive kilowatt-hour becomes the minimum and the mean power factor is better than 0.9. The compensative solution of FIX3 + TC3 + TL3 with the optimal compensation branch parameters is recommended to realize the integrated compensation of reactive power, negative sequence and harmonics. The analysis of its technical specification and economic performance validates its effectiveness and feasibility.

Key words: traction substations; dynamic compensator; reactive power; negative sequence; harmonics