

一种基于智能控制的新型配电网电能质量补偿器

袁佳歆¹, 陈柏超¹, 翁蔚², 王俊¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 福建电力调度通信中心, 福建 福州 350003)

摘要: 基于智能控制的新型配电网电能质量补偿器——晶闸管投切滤波器 TSF (Thyristor Switched Filters) 是改善配电网系统电能质量的一种有效方法。首先从理论上分析了 TSF 补偿装置对抑制电压波动的基本原理, 数学上推导出 TSF 投切最小过渡过程的角度, 其次介绍智能控制在控制器中的应用, 最后通过仿真和实验证明了 TSF 能够抑制电压跌落、电压波动及改善负荷的功率因数和减小谐波的有效性和可行性。

关键词: 配电网; 晶闸管投切滤波器; 电能质量; 功率因数; 电压波动; 谐波

中图分类号: TM72; TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)06-0039-07

0 引言

随着社会和经济的发展, 用户对配电网电能质量的要求越来越高, 与此同时用户所采用的电器产品对配电网的影响也越来越大。例如大型电动机, 电弧炉等。经研究发现功率因数低, 电压波动大, 谐波含量高等电能质量问题已成为困扰用户和供电系统的严重问题^[1]。

目前在配电网中应用较多的电能质量装置可以分为两大类: 补偿无功功率 (其中典型代表为 TSC^[2,3])、吸收谐波 (其中典型代表为 APF^[4])。经过长期研究发现 TSC 存在很严重的缺点: TSC 会产生严重的谐波放大问题; 由于系统的阻抗不确定性经常发生串联或并联谐振^[5]。1988年 N. G. Hingrani 博士首先提出“用户电力 - Custom Power”概念, 希望对供电质量的各种问题采取综合的解决办法。而具有技术优越性的有源滤波器 (APF) 没有得到广泛的应用。因为 APF 价格十分昂贵, 不适合我国的国情^[6]。

本文提出一种基于智能控制的新型配电网电能质量综合补偿器 - TSF (晶闸管投切滤波器)。本装置可以同时起到无功功率补偿和吸收谐波的作用。

1 TSF 装置的技术特点

本文研制的 TSF 补偿装置兼有 TSC (晶闸管投切电容器组) 和滤波器两者的优点, 并采用以下几个独特的技术使其达到很好的实际效果。

1) 通过在电容器支路加装电抗器, 可以同时起到限流和滤波的作用。

2) 从理论上推导出 TSF 的最小的投切角度, 采

用反并联晶闸管不同控制触发策略实现滤波器组最小无过渡过程投入的目的, 还能提高装置的响应速度起到抑制电压波动的目的。

3) 在控制策略方面选用智能控制专家系统, 能有效地避免投切振荡。

2 TSF 稳定电压的基本原理

根据公式
$$v = \frac{Q_L \cdot X_s + P_L \cdot R_s}{V}$$
 (Q_L 为负荷的无功变化值; P_L 为负荷的有功变化值), 可知负荷端电压变化是由于输电线和变压器存在阻抗。在实际中 $R_s \ll X_s$, 所以负荷端电压变化 $v \approx \frac{Q_L \cdot X_s}{V}$ 。当负荷的无功功率发生变化时, 用户端电压也会随之发生变化。应用 TSF 对无功快速变化的负荷进行实时动态补偿, 使 $Q_L = 0$ 能很大程度上改善电压跌落、电压波动等现象。

3 TSF 装置主接线

TSF 的电气主接线一般可以参照 TSC 的主接线的形式, 但是 TSF 有它自己的特点: 一般都应采用三相中性点不接地系统。这样能同时滤除负荷电流中的正序分量和负序分量。

TSF 的电气主接线的形式有很多种, 按主接线连接形式可以分成两类: 三角形和星形; 按电力电子开关器件也可以分成两类: 两个反并联晶闸管和晶闸管与二极管反并联。

第一种主接线方式 (如图 1(a) 所示), 滤波器通过反并联晶闸管与系统相连。当反并联晶闸管两端的电压过零时, 控制器发出控制导通信号使晶闸

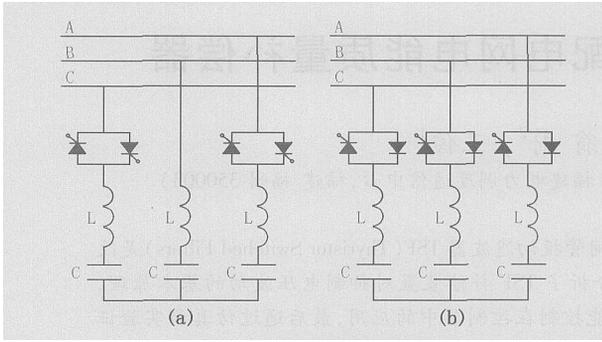


图 1 TSF的主电路接线图

Fig 1 Structure of main circuit of TSF

管导通。撤去触发控制信号后电流过零时,晶闸管截止。滤波器中存在电感,关断时电容电压将大于系统电压峰值。如果再次触发晶闸管,由于其两端电压没有过零点而不能导通;或者由于中性点电位上升,从而使另一相晶闸管不能过零导通。因此这种接线方式下,在电容器两端需要加装放电电阻。不能实现滤波器快速和频繁地投切,不适合钢铁厂、电弧炉等负荷快速变化的场合。

第二种主接线方式(如图 1(b)所示),滤波器通过晶闸管与二极管反并联与系统相连。先由二极管给电容器充电使得电容两端电压达到电源电压的峰值。当系统电压达到峰值时,控制器发出导通信号触发晶闸管。这种接线方式无须等待电容器放电,可以较简单实现滤波器的“无过渡过程”的投入和切除。但也存在不足:开始装置上电时会有较大的过渡过程(二极管导通),对电容和电感产生较大的冲击。关断的响应时间最大需要 0.02 s,响应速度不快。

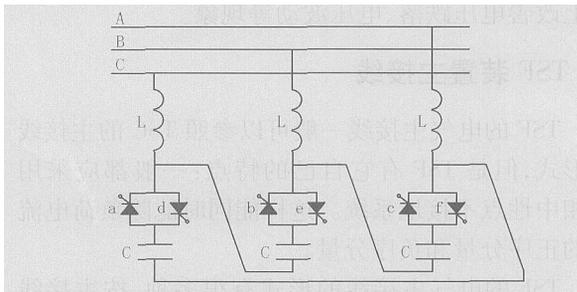


图 2 改进后 TSF的主电路接线图

Fig 2 Advanced structure of main circuit of TSF

本文采用第三种主接线方案(如图 2所示),滤波器通过两个反并联晶闸管与系统相连,三相滤波器为三角形接法。为了达到滤波器的最小过渡过程投入,本文提出晶闸管 a、b、c为两端电压过零导通,

晶闸管 d、e、f由控制器控制。当系统电压达到最大值时控制器发出控制导通信号,晶闸管导通(即 90°导通)。这种主接线方案的优点:通过对部分晶闸管过零导通可以减小装置开始上电的过渡过程。

加快 TSF相应速度,可以达到 10 ms。三角形接法解决了由于各相导通先后不同而造成中性点电位上升,使得其它相不能导通的问题。

4 TSF的投切最小过渡过程

TSF的理想数学模型:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{c} \int i dt = u_s \quad (1)$$

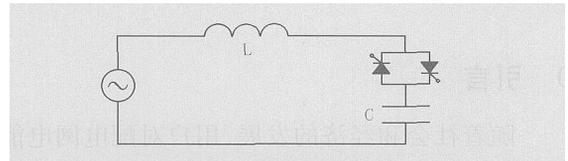


图 3 TSF理想数学模型

Fig 3 Ideal TSF mathematic model

系统电压: $u_s = U_m \sin(\omega t + \theta)$; U_m 为系统电压峰值; ω 为基波角频率, θ 为投入的初相角;电感的初始电流 $i(0_+) = i(0_-) = 0$; 电容上的初始电压: $u(0_+) = u(0_-) = u_{c0}$; L 为电感, C 为电容, i 为过渡过程电流。

解式 (1)可得过渡过程电流:

$$i = I_m \cos(\omega t + \theta) - I_m \cos \theta \cos \omega_0 t + \frac{0. C}{1 - \omega^2 L C} \cdot [(\omega^2 L C - 1) u_{c0} + U_m \sin \theta] \sin \omega_0 t \quad (2)$$

I_m 为滤波器的基波峰值电流, $I_m = U_m / \omega \sqrt{L^2 - 1/\omega^2 C}$; $\omega_0 = \omega \sqrt{1 - \omega^2 L C}$, n 为频率为基波的倍数。过渡过程电流可以分为基频分量 $I_m \cos(\omega t + \theta)$ 和高次分量 $\frac{0. C}{1 - \omega^2 L C} [(\omega^2 L C - 1) u_{c0} U_m \sin \theta] \cdot \sin \omega_0 t - I_m \cos \theta \cos \omega_0 t$

对于任何投切初相角而言,其电流的基频分量的峰值不变,所以投切初相角只能影响电流中的高次分量。

本文所需要讨论的是初相角 θ 与过渡过程电流峰值之间的关系,可以转化为初相角 θ 与过渡过程电流中高次分量峰值之间的关系。

令函数

$$f(\theta) = \left(\frac{0. C}{1 - \omega^2 L C} \right)^2 [(\omega^2 L C - 1) u_{c0} U_m \sin \theta]^2 +$$

$$(I_m \cos \theta)^2 \quad (3)$$

化简式(3)可得:

$$f(\theta) = a \sin^2 \theta + b \sin \theta + c$$

$$\text{令 } k = (\frac{1}{n^2} - 1) u_{c0}, \quad a = (\frac{n^2 - c}{n^2 - 1})^2 (n^2 - 1) \cdot$$

$$U_m^2, \quad b = (\frac{n^2 - c}{n^2 - 1})^2 2nkU_m, \quad c = (\frac{n^2 - c}{n^2 - 1})^2 (n^2 k^2 + 1)$$

a, b, c 均为常数, k 为常数;

令函数

$$g(\sin(\theta)) = a \sin^2 \theta + b \sin \theta + c \quad (4)$$

因为:

$$-\frac{b}{2a} = -\frac{2nkU_m}{2(n^2 - 1)U_m^2} = \frac{u_{c0}}{U_m}$$

当 $u_{c0} \leq U_m$ 时, $-\frac{b}{2a} = \frac{u_{c0}}{U_m} \leq 1$, $\sin \theta$ 的定义域

是小于等于 1。

$$g_{\min}(\sin(\theta)) = g(1), \quad f_{\min}(\theta) = f(\theta/2)$$

可以得出当初相角 $\theta = \theta/2$ 时, 过渡过程电流最小。

$$\text{当 } u_{c0} \leq U_m \text{ 时, } g_{\min}(\sin(\theta)) = g(\frac{u_{c0}}{U_m}), \quad f_{\min}(\theta) = f(\arcsin \frac{u_{c0}}{U_m})$$

可以得出当初相角 $\theta = \arcsin \frac{u_{c0}}{U_m}$ 时, 过渡过程电流最小。

5 TSF控制器设计

控制器的设计原理框图如图 4 所示, 首先从系统采集三相的电压电流信号经过滤波、A/D 转换传输到 DSP 数据采集计算系统中, 并将系统 A 相电压作为电网电压的同步信号, 将此信号经过锁相分频后以 50 Hz 方波信号传送给 DSP 数据采集计算系统。其次通过 DSP 数据采集计算系统计算可以得到负荷所需的无功、计算投切下一个状态的无功功率和功率因数。再将计算值传输给 PLC 控制器, 通过专家系统判断得出晶闸管投切状态。最后经过脉冲放大电路控制各相晶闸管导通。

5.1 控制策略

由于本装置是离散变量, 而通过连续的数学模型所得出的投切状态不能完整的表达出来, 因此所得出的结果往往不能满足实际的需要, 这时专家和运行人员的经验、判断是至关重要的^[7]。

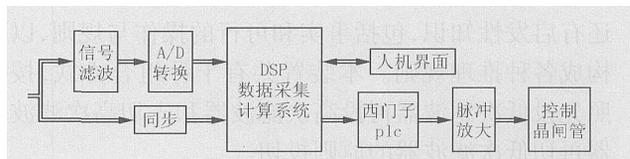


图 4 控制器原理框图

Fig 4 Diagram of controller principle

智能控制是通过计算机模拟人类的思维过程, 将其应用于自动控制领域之中。它抛开控制对象的数学模型, 能够很好的解决传统的控制技术所面临的问题。专家控制系统是基于控制对象和控制观的各种知识, 并以智能的方式应用这些知识使控制系统和受控过程尽可能优化的过程。

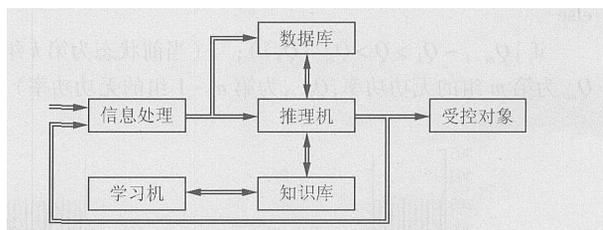


图 5 专家系统结构

Fig 5 Structure of expert system

本文所采用的专家系统结构如图 5 所示, 其主要部分的功能如下:

1) 信息处理

信息处理部分主要的工作是采集系统各相电压电流、功率因数、各个受控对象(晶闸管)的信息, 并通过计算得出负荷所需的无功功率。该部分的工作由 DSP 数据采集计算系统完成。

2) 数据库

数据库用于存储信息处理所传送来的信息、求解问题的初始数据和推理过程的中间数据, 以便推理机得出准确、理想的控制方案, 它包括电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、频率的计算, 各个晶闸管的通断情况、初始的设定值以及电容器投切次数的累加等中间信息。除此之外还需要存储滤波器的投切组态。

3) 推理机

利用知识库中的各类控制规则, 根据数据库中的实际计算值, 对负荷的功率因数和无功功率进行综合分析, 根据功率因数、无功功率双向推理原理提出一个合适的控制方案, 去控制滤波器组的投切状态。

4) 知识库

知识库以某种结构存储各种规范和专家的经验

还有启发性知识,包括事实和可行的操作与规则,以构成各种推理规则。本装置共有十种组合方式,按照先投低次滤波器再投高次滤波器和先切高次滤波器再切低次滤波器的原则投切。

(TSF rules

(if

$(0 < \cos < 0.95)$; 当功率因数小于 0.95,大于 0

if

$(Q_{n+1} - Q_k > Q > Q_n - Q_k)$; 假设当前状态为第 k 组,

Q_n 为第 n 组发出的无功功率, Q_{n+1} 为第 $n+1$ 组的无功功率, Q_k 为第 k 组的无功功率)

{

then (投第 n 组)); 即装置应该切换到第 n 组

else

if $(Q_{m-1} - Q_k > Q > Q_m - Q_k)$; (当前状态为第 k 组,

Q_m 为第 m 组的无功功率, Q_{m-1} 为第 $m-1$ 组的无功功率)

{

then (切到第 m 组)); 即装置应该切换到第 m 组

6 试验与仿真

6.1 TSF动态的改善负荷的电能质量

图 6(a)表示系统在没有 TSF 补偿时 PCC 的电压波动曲线,如图所示, PCC 的电压峰值从 296 V 降为 272 V,电压跌落 24 V, PCC (公共节点电压) 的电压波动 $v=8.03\%$, PCC 的最大电压偏差为 -12.5% 。而图 6(b)表示系统在有 TSF 补偿时 PCC 的电压波动曲线,如图 6 所示, PCC 的电压峰值从 296 V 升为 307 V, PCC 的电压波动 $v=3.05\%$, PCC 的最大电压偏差为 -4.82% 。

6.2 两种主接线方式过渡过程的比较

图 7(b)表示如图 2C 型主接线公共节点处的电流波形。由图可知在 $t=0 \sim 0.08$ s, $t=0.4 \sim 0.68$ s

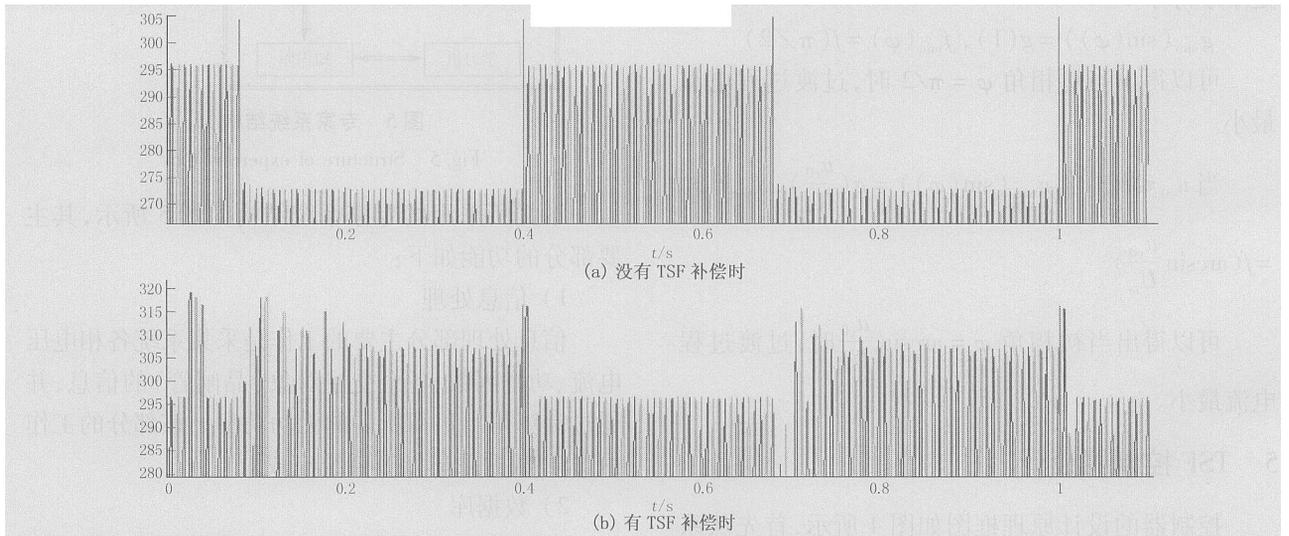


图 6 抑制电压波动的仿真结果

Fig 6 Simulation results of suppressing voltage fluctuation

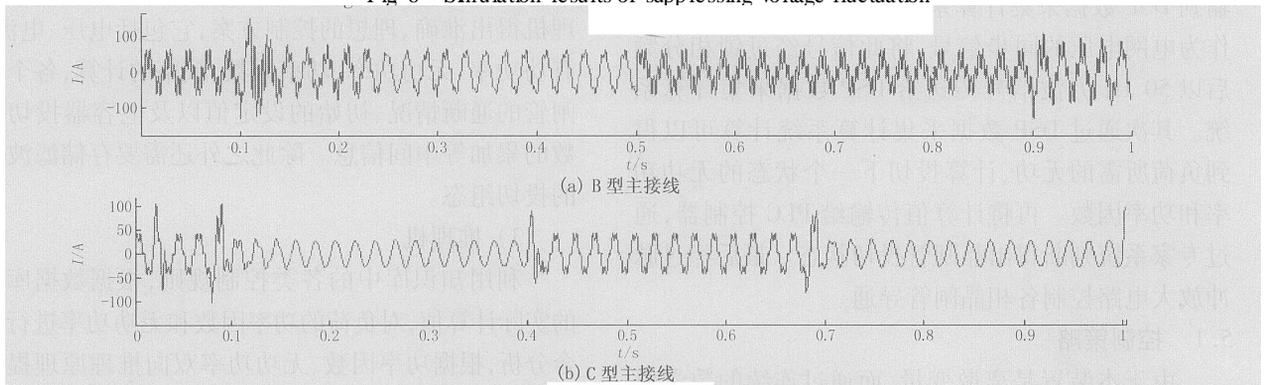


图 7 两种主接线电流过渡过程

Fig 7 Current transition process in two connections

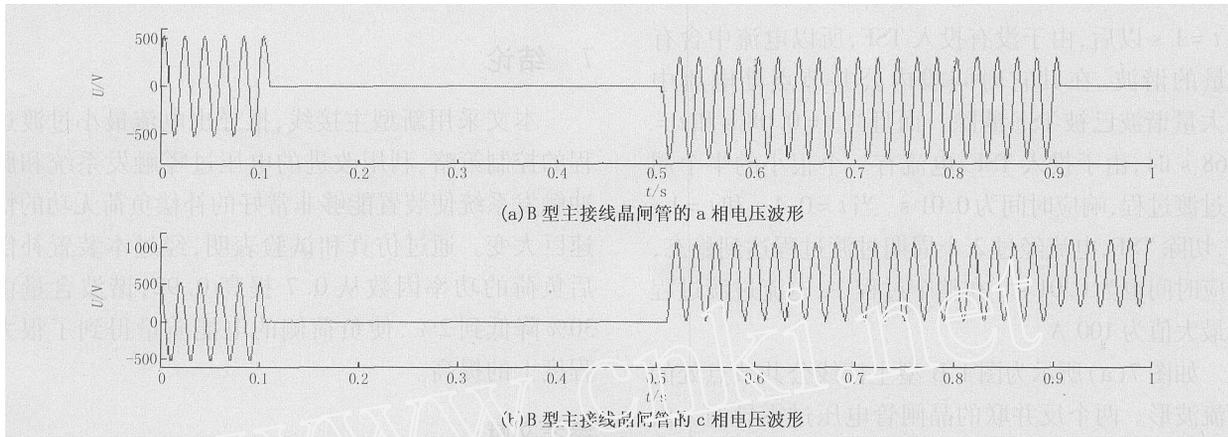


图 8 B型主接线晶闸管的电压波形

Fig 8 Voltage waveform of thyristor in B type connection

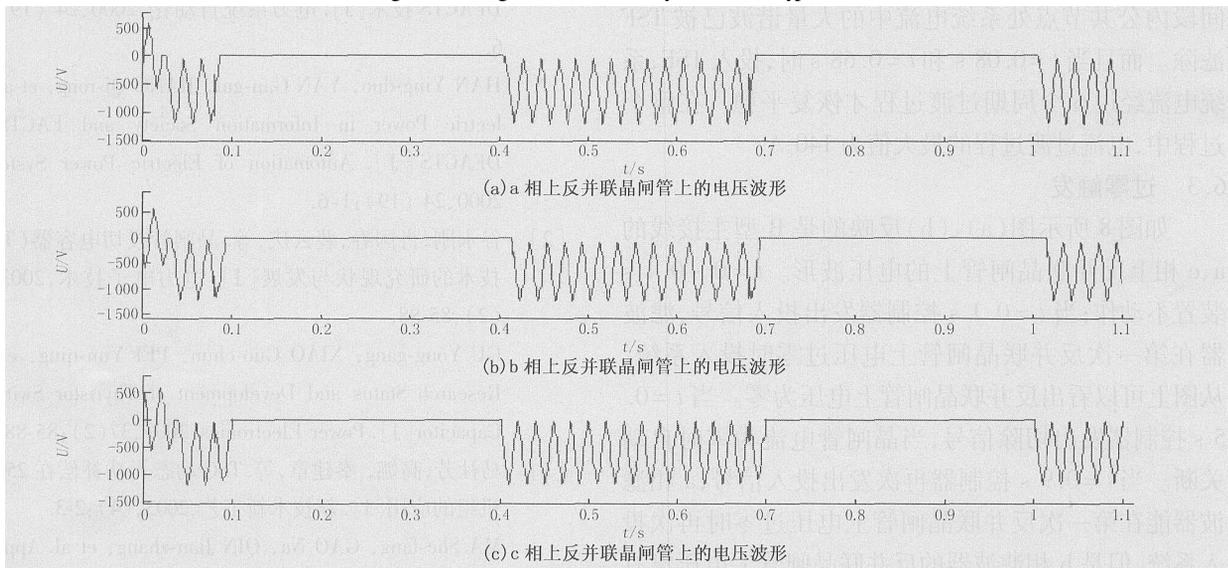


图 9 TSF主接线晶闸管的电压波形

Fig 9 Voltage waveform of thyristor in TSF connection

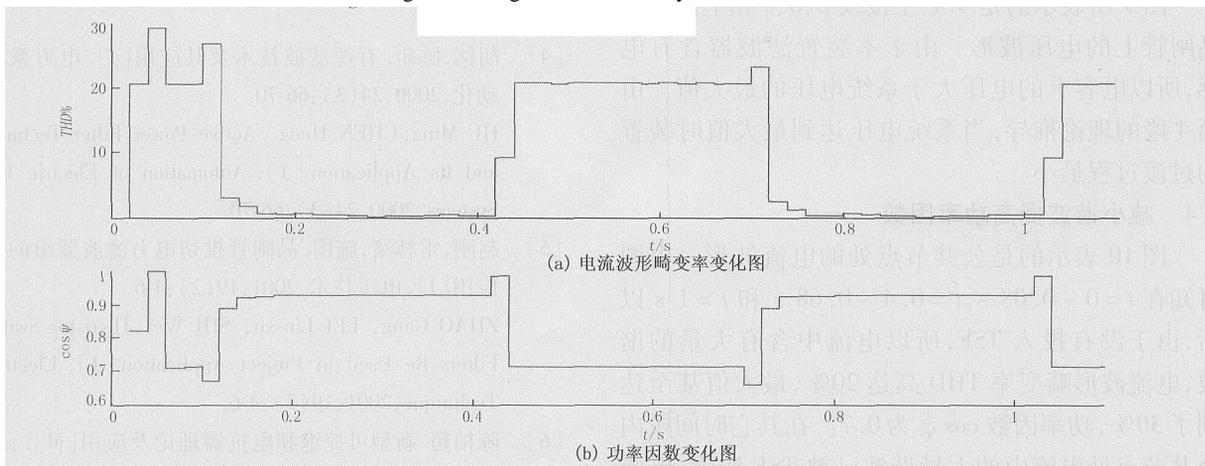


图 10 电流波形畸变率,功率因数变化图

Fig 10 Current waveform distortion factor and power factor

和 $t=1$ s以后,由于没有投入 TSF,所以电流中含有大量的谐波。在其它时间段内公共节点处电流中的大量谐波已被 TSF滤除。而且当 $t=0.08$ s和 $t=0.68$ s时,由于投入 TSF,电流有一个很小的半个周期过渡过程,响应时间为 0.01 s。当 $t=0.4$ s和 $t=1$ s时,切除 TSF,电流经过 2个周期过渡过程达到稳态,响应时间也为 0.01 s。在整个过程中,电流过渡过程的最大值为 100 A。

如图 7(a)所示为图 1 B型主接线公共节点处的电流波形。两个反并联的晶闸管电压过零导通。由图可知在 $t=0 \sim 0.1$ s和 $t=0.5 \sim 0.9$ s由于没有投入 TSF,所以系统电流中含有大量的谐波。在其它时间段内公共节点处系统电流中的大量谐波已被 TSF滤除。而且当 $t=0.08$ s和 $t=0.68$ s时,投入 TSF,系统电流经过 6个周期过渡过程才恢复平稳。在整个过程中,电流过渡过程的最大值为 140 A。

6.3 过零触发

如图 8所示图 (a)、(b)反映的是 B型主接线的 a、c相上反并联晶闸管上的电压波形。 $t=0 \sim 0.1$ s装置不动作;当 $t=0.1$ s控制器发出投入信号,滤波器在第一次反并联晶闸管上电压过零时投入系统。从图上可以看出反并联晶闸管上电压为零。当 $t=0.5$ s控制器发出切除信号,当晶闸管电流为零时自动关断。当 $t=0.9$ s控制器再次发出投入信号,a相滤波器能在第一次反并联晶闸管上电压过零时再次投入系统,但是 b相滤波器的反并联晶闸管上电压没有过零点,所以不能正常投入系统。

图 9所表示的是 TSF主接线 a、b、c相上反并联晶闸管上的电压波形。由于本装置滤波器含有电感,所以电容上的电压大于系统电压的最大值。由第 4段的理论推导,当系统电压达到最大值时装置的过渡过程最小。

6.4 减小谐波提高功率因数

图 10表示的是公共节点处的电流波形。由图可知在 $t=0 \sim 0.08$ s, $t=0.4 \sim 0.68$ s和 $t=1$ s以后,由于没有投入 TSF,所以电流中含有大量的谐波,电流波形畸变率 THD 高达 20% ,最大值甚至达到了 30% ,功率因数 \cos 为 0.7 。在其它时间段内公共节点处电流中的大量谐波已被 TSF滤除,电流波形畸变率 THD 高达 2% ,并且功率因数提高到 0.92 ,反映了 TSF对减小谐波和提高功率因数的有效性。

7 结论

本文采用新型主接线,推导出电流最小过渡过程的控制策略、利用改进的电压过零触发系统和脉冲触发系统使装置能够非常好的补偿负荷无功的快速巨大变。通过仿真和试验表明,经过本装置补偿后负荷的功率因数从 0.7 提高 0.92 ,谐波含量由 30% 降低到 2% ,使负荷侧的电能质量得到了很大程度上的提高。

参考文献:

- [1] 韩英铎,严干贵,姜齐荣,等.信息电力与 FACTS及 DFACTS技术[J].电力系统自动化,2000,24(19):1-6
HAN Ying-duo, YAN Gan-gui, JIANG Qi-rong, et al Electric Power in Information Society and FACTS & DFACTS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (19): 1-6
- [2] 谷永刚,肖国春,裴云庆,等.晶闸管投切电容器(TSC)技术的研究现状与发展[J].电力电子技术,2003,37(2):85-88
GU Yong-gang, XIAO Guo-chun, PEI Yun-qing, et al Research Status and Development of Thyristor Switched Capacitor[J]. Power Electronics, 2003, 37(2): 85-88
- [3] 马社芳,高娜,秦建章,等.TSC动态无功补偿在 250mm 机组的应用[J].新技术新工艺,2003,(4):2-3
MA She-fang, GAO Na, QIN Jian-zhang, et al Application of TSC Dynamic VAR Compensator on 250mm Milltrain[J]. New Technology & New Process, 2003, (4): 2-3
- [4] 胡铭,陈珩.有源滤波技术及其应用[J].电力系统自动化,2000,24(3):66-70
HU Ming, CHEN Heng Active Power Filter Technology and Its Application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(3): 66-70
- [5] 赵刚,雷林绪,施围.晶闸管投切电力滤波器组的工程应用[J].电工技术,2001,19(2):4-6
ZHAO Gang, LEI Lin-xu, SHI Wei Thyristor Switched Filters Be Used in Project Application [J]. Electrician Technique, 2001, 19(2): 4-6
- [6] 陈柏超.新型可控饱和电抗器理论及应用[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1999
CHEN Bai-chao Theory and Application of New Type Controlled Saturable Reactor[M]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering Press,

1999.

- [7] 刘志超,陈宏钟,张伟,等.基于专家系统的变电站电压无功控制装置[J].电力系统自动化,2003,27(2): 74-77
- LIU Zhi-chao, CHEN Hong-zhong, ZHANG Wei, et al Substation Voltage and Reactive Power Control Device Based on Expert System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 74-77.

作者简介:

袁佳歆(1981-),男,博士研究生,研究方向为电能质量与控制,柔性交流输电系统、电力电子在电力系统中的应用;E-mail: 98571yjx@sohu.com

陈柏超(1960-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统过电压及抑制、电能质量与控制、电力电子技术应用;

翁蔚(1980-),男,本科,助理工程师,研究方向为电能质量与控制、电网调度。

收稿日期: 2004-07-05; 修回日期: 2004-12-09

A new power quality compensator based on intelligent control

YUAN Jia-xin¹, CHEN Bai-chao¹, WENG Wei², WANG Jun¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Fujian Electric Power Dispatch & Telecommunication Center, Fuzhou 350003, China)

Abstract: A new power quality compensator of thyristor switched filters (TSF) based on intelligent control is an effective measure to improve power quality of distribution network system. First, its principle to control voltage fluctuation is analysed theoretically, and the minimum angle of its switching in transition process is deduced in mathematics. Then, the application of intelligent control in controller is introduced. Finally, through simulation and experiments, the effectiveness and feasibility of restraining voltage sag and voltage fluctuation, improving power quality and reducing harmonic by TSF are proved.

Key words: distribution network; TSF; power quality; voltage fluctuation; harmonics

(上接第 38 页 continued from page 38)

- [3] CHEN Zheng, LUO Cheng-mu, SU Jin-xi, et al A Fault Location algorithm for Transmission Line Based on Distributed Parameter[A]. Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE). 2001. 411-413
- [4] Novosel D, Hart D G, Udren I E et al Unsynchronized Two-terminal Fault Location Estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 130-138

收稿日期: 2004-06-25; 修回日期: 2004-09-10

作者简介:

辛振涛(1976-),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护与安全控制;E-mail: ghost_xzt@sina.com

尚德基(1977-),男,助教,从事计算机教学和仿真等方面的研究;

尹项根(1954-),男,教授,博导,主要从事电力系统继电保护和综合自动化等方面的研究。

False root and its improvement of a two-terminal fault location algorithm on transmission line

XN Zhen-tao¹, SHANG De-ji², YN Xiang-gen¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Zhengzhou Broadcast and Television University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Recently, much attention is attached to two-terminal fault location algorithm, for this algorithm is not affected by fault resistance and system impedance. However, the two-terminal fault location algorithm, which deduces the voltage amplitude on line according to long-line equation, has the possibility of false root in theory. It will get wrong fault location results under some extreme conditions. Firstly, the paper deeply analyzes the reasons of false root of the two-terminal fault location algorithm. Secondly, based on the above detailed discussion, an improved fault location algorithm with false-root detection criterion is presented, which can be widely used. At last, it is also validated by EMTP program with a simulation model.

Key words: fault location; algorithm; false root; EMTP