

新型可连续调节的 TSC 式消弧线圈

曹振种¹, 杨学昌¹, 吴振升²

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

Novel Adjustable TSC Arc Suppressing Coil

CAO Zhen-chong¹, YANG Xue-chang¹, WU Zhen-sheng²

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

摘要: 随着消弧线圈的广泛使用,传统的消弧线圈已经不能满足电网发展的需要。提出了一种新型可连续调节的 TSC 式消弧线圈,详细阐明了这种新型消弧线圈的工作原理,并比较了其优缺点。

关键词: 消弧线圈; 自动调谐; 晶闸管投切电容

中图分类号: TM8

文献标识码: A

Abstract: With the wide use of arc suppressing coil, the traditional type can not satisfy the development of power system. This paper introduces a new type of continuously adjustable TSC arc suppressing coil, illuminates its principle, and compares its advantages and disadvantages with other types.

Key words: arc suppressing coil; automatic turning; thyristor switch capacitors(TSC)

1 引言

我国的配电网一直采用小电流接地方式,如果发生单相接地故障,其故障电流为线路总对地电容电流,数值并不大,系统的线电压仍然保持对称,电网的工作条件没有被破坏。为了提高系统供电的可靠性,规程规定,允许带故障运行 2 h。但是,随着近年来配电网容量的大幅增加和电缆线路的广泛使用,系统对地的电容电流也大幅增加,如果不及时排除或限制故障,将危及到电网和设备的安全。在这种情况下,中性点加装消弧线圈是及时排除和限制配电网单相接地故障的一种有效方法。

由于传统的手动调匝式消弧线圈存在调谐麻烦、残流不易控制的缺点^[1,2],所以近些年来国内外对消弧线圈的自动调谐做了大量的研究。按改变电感的方法不同,消弧线圈主要有 4 类:自动调节分接头(即可调匝)式、可调气隙式(电感连续可调)、外加直流偏磁式和磁阀式。前两类消弧线圈采用预调谐

方式:在电网正常运行情况下,消弧线圈预先自动调谐到合理补偿位置,利用机械传动机构完成自动调谐,所用时间较长。后两类消弧线圈采用动态调谐方式:电网正常运行时,使消弧线圈工作在远离谐振点的位置;当发生单相接地故障时,使消弧线圈自动调谐到合理补偿位置,依靠电气手段实现自动调谐,调谐时间短,并且不需要机械传动部件,结构相对简单。这些能够自动调谐的消弧线圈克服了人工调谐存在的缺点,提高了调谐准确度,使接地电弧瞬间熄灭。但是上述几种消弧线圈都不能或很难实现容量的连续调节,即系统无法在任意最佳的补偿状态下工作。利用晶闸管投切电容(TSC)进行补偿的消弧线圈也属于动态调谐方式,其调谐速度快,可靠性高。但传统的 TSC 消弧线圈也无法实现对电网电容电流的连续补偿,改变 TSC 消弧线圈晶闸管导通角度则可以解决这个问题,在保持消弧线圈快速调谐的同时,实现消弧线圈的连续调节,使消弧线圈工作在最佳的补偿状态,进一步提高电网运行的安全性和供电质量。

2 TSC 式消弧线圈的工作原理

利用晶闸管投切电容的调容式消弧线圈是继调匝式、调气隙式以及调直流偏磁式消弧线圈之后的一种新型自动调谐式的消弧线圈^[3]。其结构见图 1。

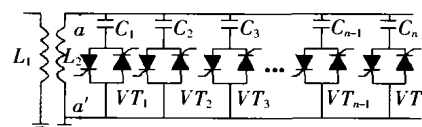


图 1 TSC 式消弧线圈原理图

由于消弧线圈接于电网中变电站或发电厂的中性点,TSC 式消弧线圈又带有二次绕组,因此 TSC 式消弧线圈的运行方式等效于一台单相运行的变压器。图 1 中: L_1 是高压绕组,其电感值恒定; L_2 为低压绕组,与其并联接有 n 组电容器组。通过晶闸管控制接

入电容器组的组数,就可调节从高压绕组两端看去的等值电感量,从而实现消弧线圈对电流的调节。

从本质上来讲,尽管这种 TSC 式消弧线圈能够利用增加电容器组数的方法来尽可能准确地实现电感电流的调节,但仍然无法准确实现电感电流的连续调节,因为投入 $n-1$ 组电容和投入 n 组电容得到的电感电流之间仍然会出现电流的突变。在这种调节方式下,晶闸管的工作状态只有两种:全导通(晶闸管的触发角为 0)和截止(晶闸管的触发角为 π)。

为了满足脱谐率和残流的要求,消弧线圈必须保证一定的补偿准确度。TSC 式消弧线圈是以增加电容器组数为代价实现补偿准确度的。如:如果按照 $C_1:C_2:\dots:C_n=1:2:\dots:2^{n-1}$ 的方法确定电容器的电容量,那么 $n=4$ 时(即二次侧并联 4 组电容器组),电容器组共有 2^4 种组合方式,其等效电容量为 $0, C_1, 2C_1, \dots, 15C_1$, 补偿容量的最大准确度为 6.25%, 即并联电容器组运行方式的每一次变化,最小只能使容量改变 6.25%,而不能实现容量的连续调节。 $n=5$ 时(即二次侧并联 5 组电容器组),电容器组共有 2^5 种组合方式,其等效电容量为 $0, C_1, 2C_1, \dots, 31C_1$, 补偿容量的最大准确度为 3.125%。

3 新型可连续调节 TSC 式消弧线圈工作原理

其实,如果利用现有的元件,改变晶闸管的控制方法:从 $0\sim\pi$ 之间任意角度触发,利用改变与之串联的电容器的交流阻抗,就可以实现电容电流的连续变化,从而实现消弧线圈电感电流的连续调节。

如图 2 所示的电路,设 $U=U\angle-\varphi$, 其中: $\varphi=\arctan\frac{1}{\omega RC}$, 在晶闸管全导通时(触发角 $\varphi=0$), $I=$

$I\angle 0$, 电流的有效值为 $I=\frac{U}{|Z|}$, 其中: $Z=R+\frac{1}{j\omega C}$ 。

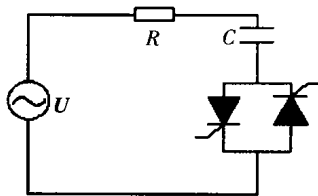


图 2 消弧线圈副边的等效电路图

图 2 中: R 是副边等效电阻,其作用主要是限制高次谐波电流分量的幅值和限制在导通瞬间产生的巨大电容电流幅值。

当晶闸管触发角为 φ 时,在一个周波内电路的暂态电流为:

$$i(t)=\sqrt{2} I_m \sin \omega t [\varepsilon(\varphi)-\varepsilon(\pi)+\varepsilon(\pi+\varphi)-\varepsilon(2\pi)]$$

其中: $\varepsilon(t)$ 为单位阶跃函数,其定义为:

$$\varepsilon(t)=\begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$$

把 $i(t)$ 展开为傅立叶级数:

$$\frac{I_1}{I}=f_1(\varphi)=\frac{\pi-\varphi+\frac{1}{2}\sin 2\varphi}{\pi}$$

$$\frac{I_k}{I}=f_k(\varphi)=\frac{1}{\pi}\left[\frac{\sin(k+1)\varphi}{k+1}-\frac{\sin(k-1)\varphi}{k-1}\right]$$

$$k=3, 5, 7, 9, \dots \quad (1)$$

式中: I_1 是基波电流的有效值, I_k 是 k 次谐波电流的有效值。

$$|Z'(\varphi)|=\frac{U}{I_1}=\frac{U}{I} \times \frac{\pi}{\pi-\varphi+\frac{1}{2}\sin 2\varphi} =$$

$$|Z| \times \frac{\pi}{\pi-\varphi+\frac{1}{2}\sin 2\varphi} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,由于改变了晶闸管的触发角 φ ,使得从电源端看到的回路阻抗发生了改变,数值从 $|Z|$ 变为 $|Z'|$, Z' 是晶闸管的触发角 φ 的函数。图 3 给出了晶闸管的触发角 φ 在 $0\sim\pi$ 之间变化时,

$\left|\frac{Z'}{Z}\right|$ 的变化规律。可以看出, $\varphi=0$ 时, $\left|\frac{Z'}{Z}\right|=1$,即晶

闸管全导通时,回路的等效阻抗就是 Z ; $\varphi=\pi$ 时,

$\left|\frac{Z'}{Z}\right|=\infty$,即晶闸管不导通时,回路的等效阻抗是

∞ ; φ 取 $0\sim\pi$ 之间任意角度, $\left|\frac{Z'}{Z}\right|=\frac{\pi}{\pi-\varphi+\frac{1}{2}\sin 2\varphi}$,

即晶闸管在 $0\sim\pi$ 之间任意角度导通时,回路的等效阻抗为从 $|Z|$ 到 ∞ 之间的任意值,且回路的等效阻抗 Z' 与晶闸管触发角 φ 直接为——对应关系,随着 φ 的增大, $|Z'|$ 单调递增。即晶闸管的触发角 φ 在 $0\sim\pi$ 之间变化时,回路的等值电容在 C 到 0 之间单调变化。

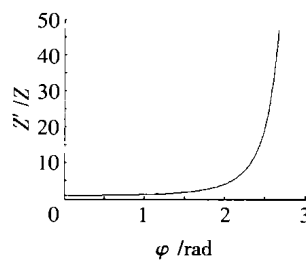


图 3 等效阻抗与可控硅触发角的关系

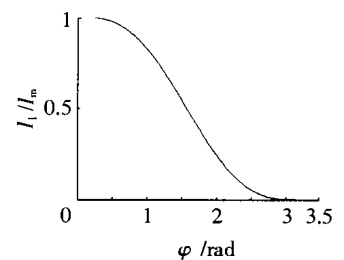


图 4 基波电流与晶闸管触发角的关系

图 4 是 $\frac{I_1}{I_m}=f_1(\varphi)$, 其物理意义为:随着 φ 的变化,基波电流值的变化趋势。随着晶闸管触发角 φ 在 $0\sim\pi$ 间的变化,基波电流值单调递减。

从上述分析可以看出,改变晶闸管触发角 φ ,就可以改变回路的等效阻抗,使回路等效阻抗连续单调变化(图 3),从而可以控制回路中的电容电流单调连续变化(图 4),相当于控制消弧线圈的电感电流连续变化,实现了消弧线圈补偿容量的连续调节,

使消弧线圈工作在最佳补偿状态。所以在这种消弧线圈中,只需要一组电容器就完全可以满足要求。

4 谐波问题

在这种消弧线圈中,通过控制反向并联晶闸管组的触发角,控制了消弧线圈的补偿容量。但是作为灵活开关器件控制消弧线圈补偿容量的同时,这种反向并联的晶闸管组也带来了非常严重的谐波问题。可以清楚地从图5中看出各次谐波含量的分布。

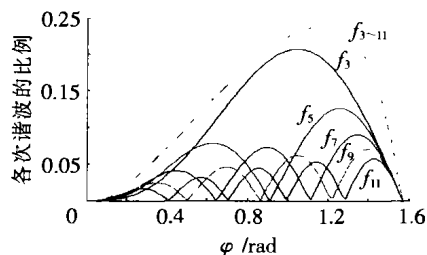


图5 高次谐波

式(1)给出了各高次谐波电流的有效值。

$$f_{3-11}(\varphi) = \sqrt{\sum_{k=3}^{11} f_k^2(\varphi)}$$

$$f_3(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sin 4\varphi}{4} - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right)$$

$$f_5(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sin 6\varphi}{6} - \frac{\sin 4\varphi}{4} \right)$$

$$f_7(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sin 8\varphi}{8} - \frac{\sin 6\varphi}{6} \right)$$

$$f_9(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sin 10\varphi}{10} - \frac{\sin 8\varphi}{8} \right)$$

$$f_{11}(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sin 12\varphi}{12} - \frac{\sin 10\varphi}{10} \right)$$

从图5中可以看出: $\varphi=65.7^\circ$ 时, $f_{3-11}(\varphi)$ 达到最大,谐波含量高达23.66%。 $\varphi=61.2^\circ$ 时, $f_3(\varphi)$ 达到最大,3次谐波含量高达20.67%。

很明显,3次及其奇倍数谐波是主要谐波,必须滤掉,否则如此大的谐波电流注入电网后会造造成非常严重的后果。为了解决谐波问题,可以采取两种措施:

①采用技术上非常成熟的有源滤波器(APF)进行滤波。即利用可控的功率半导体器件向电网注入与原有谐波电流幅值相等、相位相反的电流,使电源的总谐波为零,达到实时补偿谐波电流的目的^[4]。目前,APF已经可以作到大容量、实时补偿任意波形的高频谐波,但从经济上考虑不太现实。②对传统的TSC消弧线圈做一些改进,在副边加入第3绕组(与其并联接有电容 C_r),该绕组和电容 C_r 组成3次谐波谐振回路,这样就可以除去3次谐波及其奇数倍谐波电流分量。

5 结语

(1)改变晶闸管的触发角可以实现TSC式消弧线圈补偿容量的连续调节,使消弧线圈工作在最佳补偿状态,更好地满足消弧线圈在快速熄弧、脱谐度、残流等方面的要求。

(2)新型可连续调节的TSC式消弧线圈不需要并联多组电容器组,简化了装置结构,减小了装置体积,节约了成本。适当选择电容参数,一组电容器就能够满足对于消弧线圈补偿容量和准确度的要求。

(3)谐波问题可以通过在消弧线圈副边加入第3绕组进行滤波等途径有效解决。

参考文献:

- [1] 李景禄,刘春生,胡毅,等.配电网自动跟踪补偿消弧装置[J].变压器,2000,37(10):33-36.
- [2] D Griffel, Y Harmand, V Leitloft, et al. A New Deal for Safety and Quality on MV Network[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(4): 1428-1433.
- [3] 徐玉琴,陈志业,李鹏.晶闸管投切电容式消弧线圈的设计与应用研究[J].电力系统自动化,2001(13):38-41.
- [4] 胡铭,陈珩.有源滤波技术及其应用[J].电力系统自动化,2000(10):66-70.

作者简介:曹振翀(1976-),男,博士研究生,主要从事电力系统自动化和电力系统保护等领域的研究。

《高压开关设备检测和试验》

新书推荐

由张裕生编著的《高压开关设备检测和试验》一书已由中国电力出版社2004年2月出版,该书介绍了高压开关设备检测和试验的标准、要求和方法,主要包括绪论、高压开关的机械试验、高压开关的绝缘试验、高压开关的有机绝缘件的绝缘试验、高压开关的温升试验、高压开关的短时耐受电流试验、高压断路器的开断试验、SF₆断路器的基本检测方法、GCB自能灭弧室开断试验中的问题及处理、高压开关的交接试验和预防性试验等。

该书不仅适用于电力企业高压开关设备安装、调试、运行、检修等方面的技术人员,高压开关设备制造行业的检验、试验技术人员,广大农村、城镇和工厂从事高压开关设备安装、调试的人员使用;亦可以作为高压开关设备检验和试验人员的教材;同是还可供大中专院校相关专业师生参考。该书约12万字,32开本,定价:10.00元。