

一种新型消弧线圈补偿装置的暂态性能仿真研究

苏建设, 陈 陈

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 介绍了一种可控硅调节的消弧线圈电抗器装置, 并着重研究适用于 6~66 kV 配电网的消弧线圈自动跟踪补偿装置中的可控硅调节电抗器的工作原理及其暂态性能。其中主要分析了突然投入理想正弦电源和接入电网中性点后电抗器本身的暂态响应及在稳定电源下工作点的调节, 同时重点研究了在发生单相金属接地、单相高阻接地和间歇电弧接地情况下可控硅调节电抗器补偿容性电流的能力。通过实例进行 EMTP 仿真证明, 新型可控硅调节的消弧线圈电抗器装置在适当的控制策略下, 其电磁暂态过渡时间是满足要求的, 从而说明了该方案的有效性和可行性。

关键词: 消弧线圈自动跟踪补偿装置; 可控硅调节电抗器; 暂态性能; EMTP 仿真

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)01-0084-06

1 引言

随着城网容量的扩大及电缆逐渐取代架空线路, 单相接地时弧道中的电容电流增大而不能自熄, 持续电弧会引起弧光接地过电压, 而且单相接地故障还易扩大为相间短路。因此, 采用高质量的消弧线圈自动跟踪补偿装置对提高 6~66 kV 配电网供电可靠性和安全性有积极的作用, 能使瞬时性故障自动消除而不影响供电。目前应用的多类可调节消弧线圈主要有调匝式、调容式、调气隙式、磁阀式、直流偏磁式等, 但都存在电感量非连续可调、动作速度慢、噪音大、调节范围小、脏污易使机械动作失灵、发热大、伏安特性非线性等缺点^[1-3]。本文研究可控硅调节的消弧线圈电抗器装置, 着重于电抗器型消弧线圈自动跟踪补偿装置在突然投入理想正弦电源和接入电网中性点后的暂态响应特性, 以及在发生单相金属接地、单相高阻接地和间歇电弧接地情况下可控硅调节电抗器的补偿容性电流能力。

2 可调电抗器原理

作为研究对象的可调电抗器示意图(如图 1), 为一个高短路阻抗(一、二次绕组间)单相三绕组变压器, 为消弧线圈本体。二次绕组 S 用晶闸管短路, 通过调节可控硅触发角产生间歇性导通电流, 基波电流随可控硅触发角非线性变化, 等效于调节 S 绕组电抗。三次绕组 T 连接特殊设计的滤波器电路, 相当于对谐波短路, 用以平衡 S 绕组电流谐波产生的磁通, 从而将一次绕组 P 的总谐波电流畸变率控制在很小的范围内。以 10 kV 配电系统消弧线圈为例, 假设如

下合理技术参数: 额定电压 6.062 kV, 额定容量 600 kVA, 调节范围电抗 100%~ , 电流 0~100 A。S 绕组和 T 绕组额定电压均为 600 V; P 和 S 绕组漏抗是 2~4 倍关系(折算后的值), 总短路阻抗为 100%; T 绕组漏抗是 P 和 S 绕组平均值的 1/15。可控硅触发采用相对于一次绕组电压过零点的简单触发, 不考虑实际电路可能采用的 PLL(锁相环)和 FFT 算法。

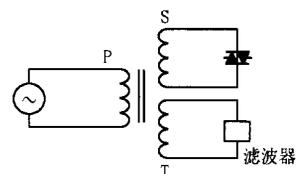


图 1 可控硅调节电抗器示意图
Fig. 1 Schematics of TCR

3 暂态特性分析

分析暂态过程的目的是考察调节电抗器的电磁暂态过渡时间和可能的过电压、过电流^[4]。暂态过程分两种: 电抗器本身的暂态过程, 即突然投入电源的暂态响应及在稳定电源下工作点的调节, 和接入电网后的暂态过程, 即在电网中性点投入运行、接地故障后的补偿动作、工作点调节。

3.1 电抗器本身的暂态响应

3.1.1 理想正弦电源投入

一次绕组突然投入正弦电源, 可控硅触发角为恒定值。起始触发时刻由控制策略决定, 这里取固定时延和按瞬时电压阈值触发两种方案。可调电抗器三次绕组滤波器总并联支路在工频下的等效电容量为取 $C = 850 \mu\text{F}$ 。

(1) 一次绕组电源6.062 kV,0.1 s 时刻合闸,可控硅在延时 5 ms 后触发

电源初始相位角和可控硅触发角不同,暂态过程亦不同。以下取电源幅值投入和过零点投入两种典型情况。

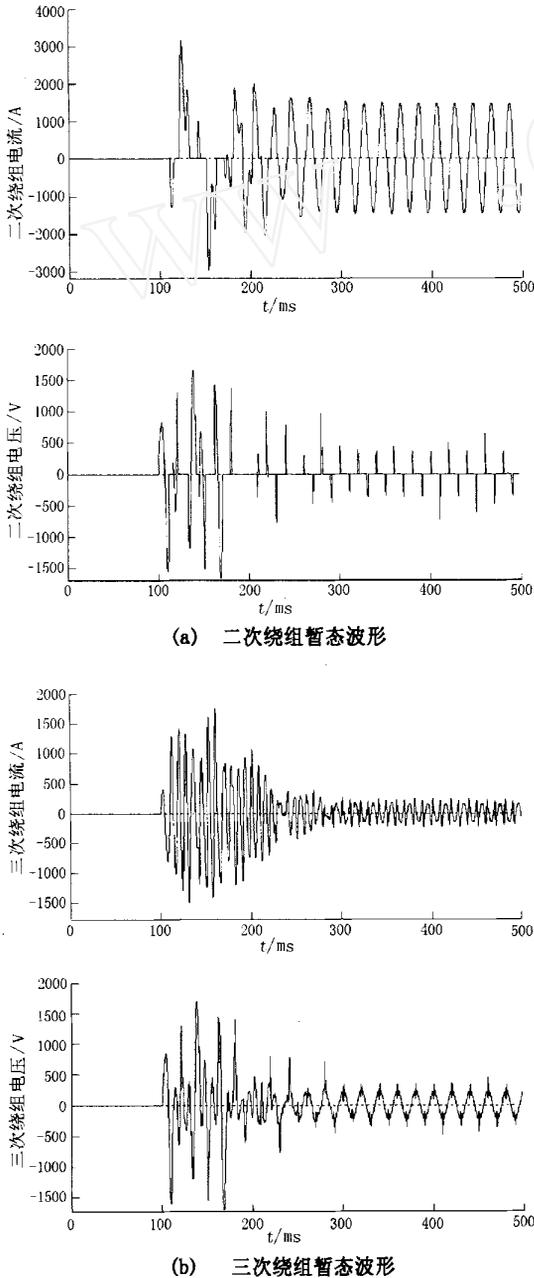


图2 电源幅值投入,触发角 100°

Fig.2 Waveform when switched on with the source and firing angle 100°

由图 2 和图 3 可见,一次绕组突然投入正弦电源,在可控硅的调节下,一次绕组电流能较快达到稳定,各绕组过电流和过电压的最严重情况如图 2(限于篇幅,触发角为 120 时情况未给出)。作为比较,

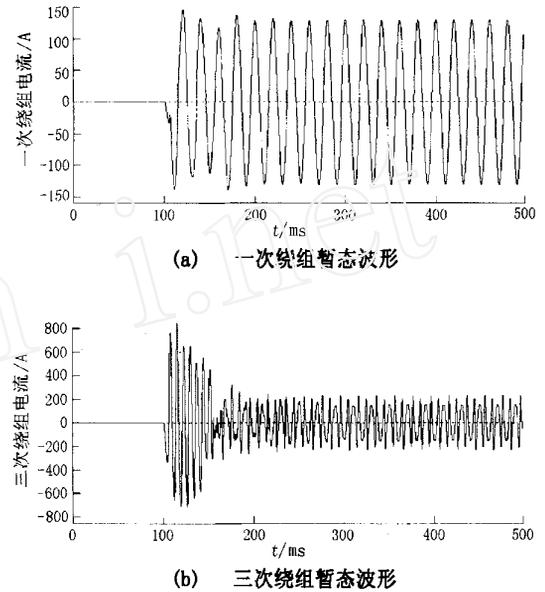


图3 电源过零点投入,触发角 100°

Fig.3 Waveform when switched on at the zero-crossing point of source and firing angle 100°

当投入电源的是固定电抗器(品质因数 50),其过渡过程见图 4 和 5,电源过零点投入是最严重情况,暂态过渡时间完全取决于电抗器本身的阻尼^[6]。正确的可控硅调节能对系统暂态过程附加一个阻尼作用,这早已被可控硅在其他领域的应用所证实^[7]。

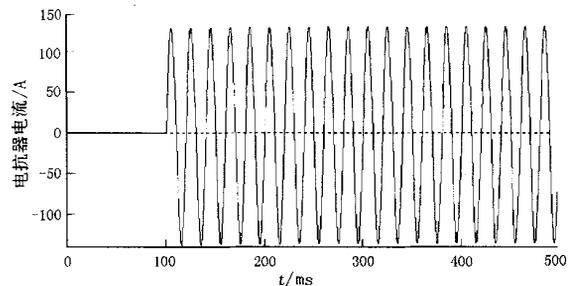


图4 电源幅值投入电抗器

Fig.4 Waveform of current when reactor switched on at the peak point of source

(2) 一次绕组电压在 0.1 s 时刻由 0 V 上升 6.062 kV,可控硅在电压3.0 kV时刻触发

取可控硅触发角为 100 和 120°,暂态过程见图 6 和图 7。实际上,此种情况下的暂态波形与(1)中情况并无本质区别。

3.1.2 触发角调节

正弦稳态电源下工作点的调节,即可控硅触发角跳变,暂态过程与电源相位角无关。暂态响应和过电压、过电流波形仅与可控硅工作点和触发角跳变大小有关。为仿真方便,且谐振点在 110 左右,故

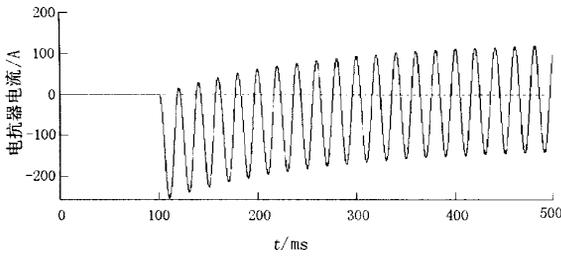
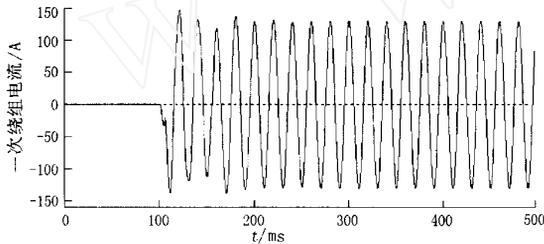
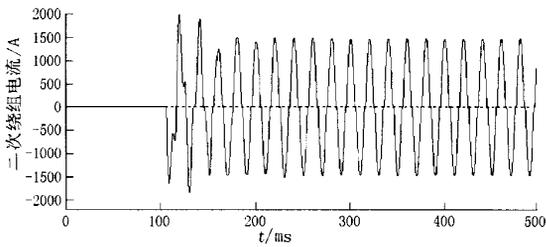


图5 电源过零点投入电抗器

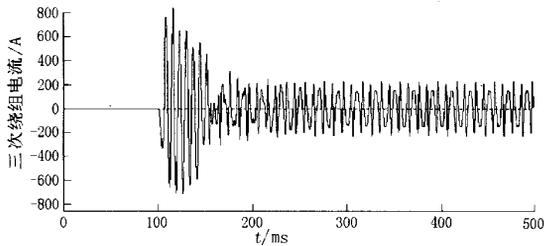
fig. 5 Waveform of current when reactor switched on at the zero-crossing point of source



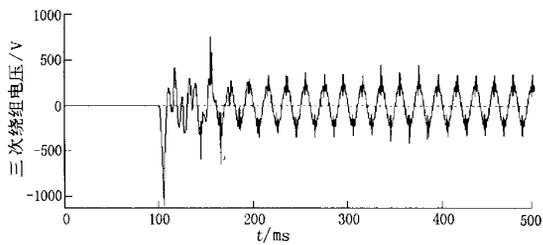
(a) 一次绕组电流暂态波形



(b) 二次绕组电流暂态波形



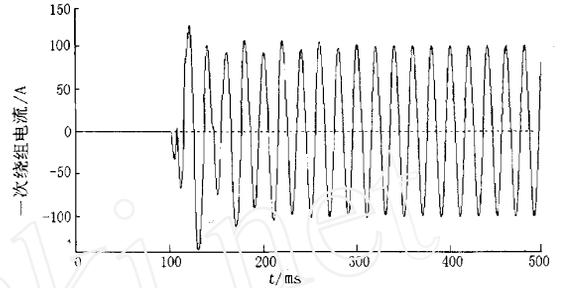
(c) 三次绕组电流暂态波形



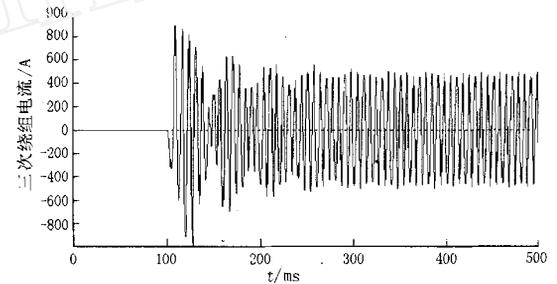
(d) 三次绕组电压暂态波形

图6 触发角 100°

Fig. 6 Waveform of current with firing angle 100°



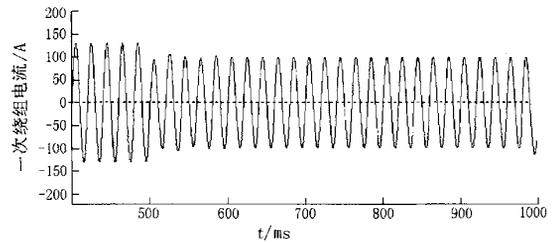
(a) 一次绕组电流暂态波形



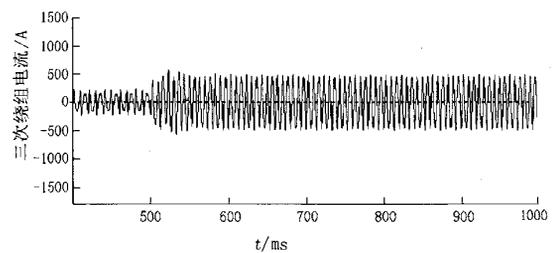
(b) 三次绕组电流暂态波形

图7 触发角 120°

Fig. 7 Waveform of current with firing angle 120°



(a) 一次绕组电流波形



(b) 三次绕组电流波形

图8 触发角 0.5 s 时刻 100° 120°

Fig. 8 Waveform of current with firing angle 100° 120° at t = 0.5 s

取触发角跳变角度分别为 100° 120°, 120° 100° 两种典型跳变角度计算。

由图 8 和图 9 可见,在一次绕组施加稳态正弦电源下,即使是较大的触发角跳变,所引起的暂态过电流也不大,暂态过电压也很小,过渡时间为 3 ~ 5 个周波。

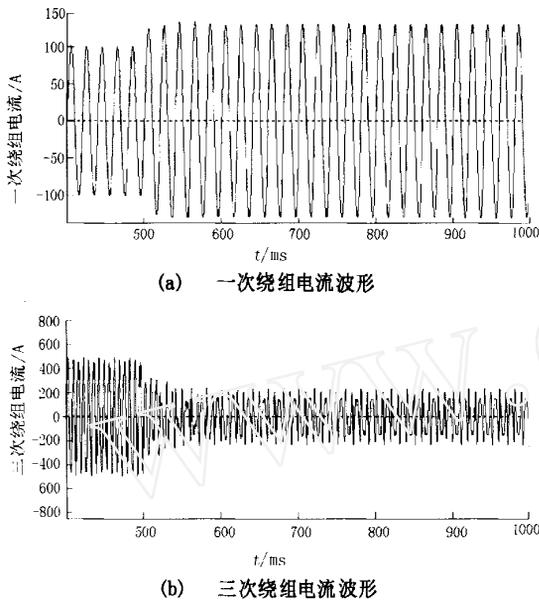


图9 触发角 0.5 s 时刻 120° 100°
Fig.9 Waveform of current with firing angle 120° 100° at $t = 0.5$ s

3.2 电抗器接入电网后的暂态特性

电抗器接入电网中性点后的电磁暂态过程与理想正弦电源供电的情况不同,因为附加了电网本身的暂态过程。仿真系统如图 10 所示^[5]。

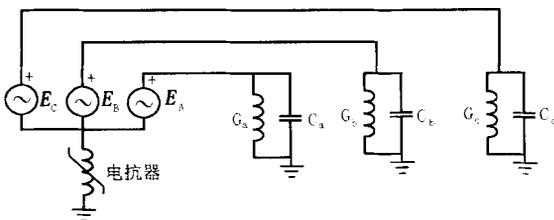


图 10 仿真系统示意图
Fig.10 Schematic of simulation system

电网:线电压 10.5 kV,线路总电容 40.68 μF (对应于总电容电流 77.47 A),不对称度 2%,电网阻尼率 2%。可调电抗器 $C = 850 \mu\text{F}$ 。

可调电抗器有可能不是直接连接电网中性点,而是连接地变压器中性点。但接地变的正序阻抗很大、零序阻抗较小,而消弧线圈正是在系统不对称的时候才起作用,如果忽略接地变的零序阻抗后,实际上仍相当于上图的系统连接方式。以下计算电抗器投入电网和补偿短路接地电容电流的情况。

3.2.1 投入电网

图 10 所示仿真系统在稳态不接地运行时,中性点位移电压为 121 V。若投入电抗器,须使电抗器工作在远离与系统(线路电容)的串联谐振区。谐振点相当于可控硅调节在 115° 。图 11 示出了 0.1 s 投入

电抗器于电网,可控硅触发角 115° 时,中性点谐振电压的波形。通过更多仿真可以看出,触发角偏离谐振点越多,中性点稳态电位和暂态过渡时间就越小。图 12 给出了触发角为 150° 时投入电网时情形,它远离谐振点,对系统扰动最小。

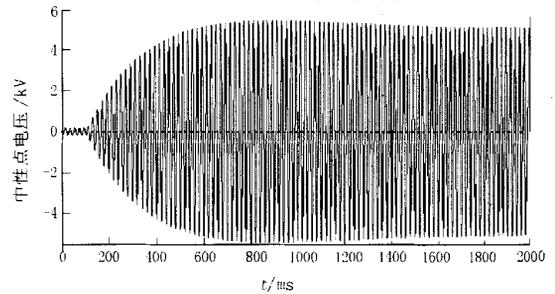


图 11 投入于谐振点时的中性点电压(触发角 115°)
Fig.11 Voltage at neutral point with firing angle 115°

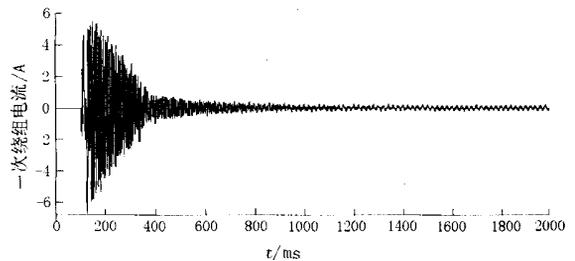


图 12 偏离谐振点时的波形(触发角 150°)
Fig.12 Waveform of current with firing angle 150°

3.2.2 单相金属接地

若电网发生单相接地短路,接地弧道中将流过很大的电容电流。此短路电流可以由消弧线圈提供的电感性电流补偿,从而使电弧熄灭。可控硅调节的电抗器由于没有机械动作,响应速度可以很快,在最短的时间内将短路电流限制在很小的值。可控硅在何种情况下进行补偿动作的控制策略此处不作探讨。这里仅假设当中性点电压达 3 kV 时,立即调整可控硅触发角。即一旦探测到中性点位移电压超过 3 kV 阈值,下一个可控硅触发角将是能补偿电容电流的触发角。设故障前,电抗器工作在远离谐振区的点(触发角 150°),故障后电抗器立即调节触发角为 115° (全补偿)。对 A 相线路电压为幅值或零时发生永久性金属接地短路(0.8 s 时刻),接地电阻分别为 5、20 和 100 Ω 时进行了详细仿真。图 13 对应 A 相线路电压为零时发生金属接地,接地电阻为 100 Ω 时的情形。从图中可看出,电抗器 2 个周波就将短路电流限制在残流值约 1.9 A。

经多次试算结果表明,对单相金属接地,可调电抗器将短路电流限制在 5 A 以内的时间为 2 ~ 10 个

周波,从统计上说,一般在线路电压幅值附近短路情况较多,此时补偿过渡时间为3周波左右。

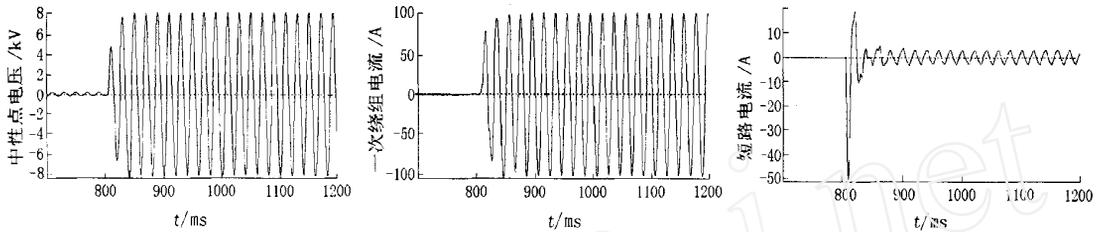


图 13 单相金属接地补偿

Fig. 13 Waveform of voltage or current in case of single-phase compensation with metal earthed

3.2.3 单相高阻接地

考虑 A 相线路电压为零时发生金属接地(0.8 s 时刻),接地电阻1000 情形。仿真结果如图 14。高

阻接地与金属接地有不同的波形特征。高阻接地波形变化平缓,短路电流下降速率慢但短路电流本身不大。

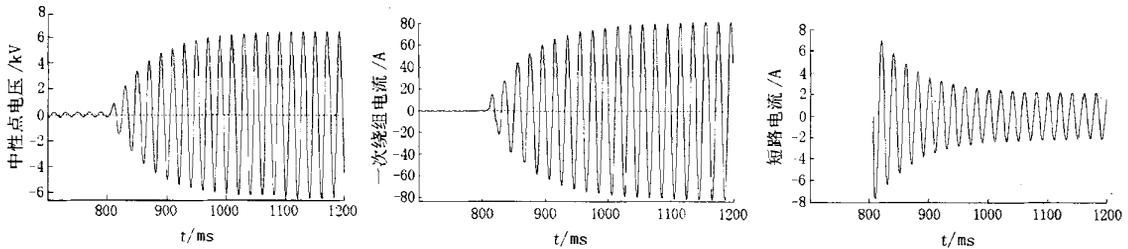


图 14 单相高阻接地补偿

Fig. 14 Waveform of voltage or current in case of single-phase compensation with high resistance earthed

3.2.4 间歇电弧接地

如果单相接地电弧不足以形成稳定的电弧,且熄弧后又有重燃,则出现间歇性电弧接地,对系统危害很大。消弧线圈可以减小故障电流,使之可以自熄,并且可以阻尼恢复电压的上升速度,使电弧难以重燃。脱谐度越小,效果越显著。图 15 为故障时调节可控硅触发角为 115 的情况,图 16 是可控硅触发角始终维持在 150°。

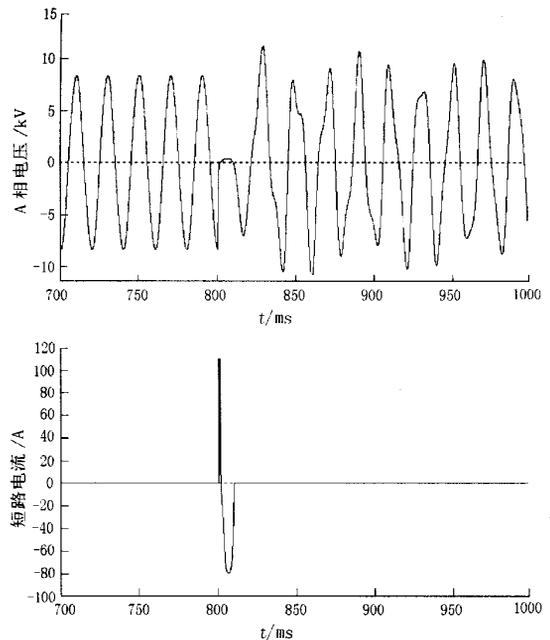


图 16 恢复电压(触发角为 150°)

Fig. 16 Waveform of restore voltage with firing angle 150°

一般来说,电弧发弧和重燃发生在线路电压幅值附近,而熄弧发生在工频或高频电流过零点。这里考虑 A 相幅值时发弧,故障电流熄弧后的恢复电压波形。由图可见,在触发角为 115 时,不仅减小故障电流,也降低了恢复电压上升速度,能有效抑制电弧重燃。

4 结语

高质量的消弧线圈自动跟踪补偿装置对可控硅调节电抗器在各种运行条件下有着较高的暂态性能要求。通过以上仿真计算和分析可以说明,所介绍的可调电抗器型消弧线圈自动跟踪补偿装置在突然投入理想正弦电源和接入电网中性点后,具有良好的暂态响应特性,而且在稳定电源下工作点可灵活

调节,工作范围宽,同时在发生单相金属接地、单相高阻接地和间歇电弧接地情况下可控硅调节电抗器具有优良的补偿容性电流能力。从而说明这种设计是正确的和可行的,能够为进一步开发装置提供理

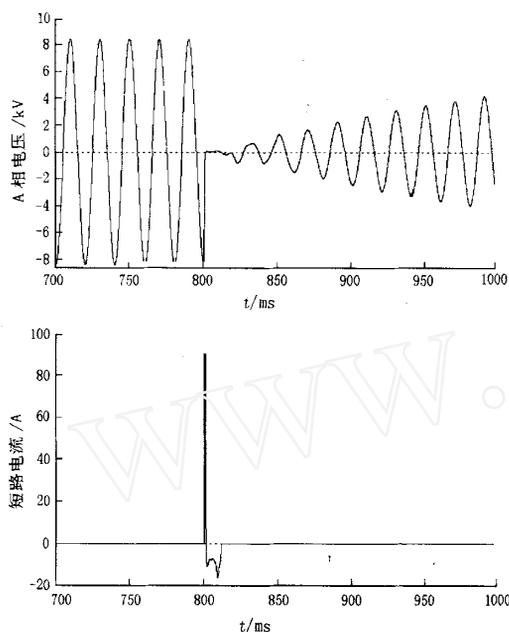


图 15 恢复电压(触发角为 115°)

Fig. 15 Waveform of restore voltage with firing angle 115°

论依据。

参考文献:

- [1] 龙小平, 叶一麟. 连续可调消弧线圈[J]. 电网技术, 1997, 21(2): 53-58.
- [2] 李卫. TCR 控制及数学模型的研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 1996, 18(1): 115 - 118.

- [3] 曾祥群, 于永源, 尹项根, 等. 基于注入信号法的消弧线圈自动调谐新技术[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 38-41.
- [4] 加拿大电工协会工程与运行分会静止补偿器委员会编. 刘取, 马维新, 周双喜, 等译. 静止补偿器用于电力系统无功控制[M]. 北京: 水利水电出版社, 1989.
- [5] Uzunoglu M, Kocatepe C, Yururtaci R, et al. The Various Operating Conditions, Harmonics Effects and Stability of Thyristor Controlled Reactor [C]. Proceedings of TENCON 2000, Vol. 2, 2000: 347-350.
- [6] Nguyen T T, Humpage W D. TCR and SR Compensators in Composite Electromagnetic Transient Simulation[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1989, 136(3): 195-205.
- [7] Garcia N, Medina A. Efficient Computation of the Periodic Steady - State Solution of Systems Containing Nonlinear and Time - Varying Components: Application to the Modeling of TCRs[C]. Proceedings of the Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 2, 2000: 673-678.
- [8] 电力科学研究院系统所电磁暂态计算组. EMTP 作用手册[Z]. 北京: 电力科学研究院, 1990.

收稿日期: 2002-04-22; 修回日期: 2002-08-14

作者简介:

苏建设(1972 -), 男, 博士研究生, 从事电力系统无功补偿和电网谐波抑制方面的研究;

陈 陈(1938 -), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行与控制方面的研究。

Study of simulation of transient state performance of a new type of Petersen - coil in distribution systems

SU Jiann she, CHEN Chen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper presents a new type of Petersen-coil automatic compensation equipment, then focus on study of the principle and transient state performance of Thyristor-controlled Reactor(TCR). It mainly contains the transient state response when switching to the ideal sinusoidal source and the network neutral point, the adjustment of the operational point under the steady working source, and the capability of the capacitive current compensation in circumstance of single phase metal grounding, single phase high - impedance grounding, or intermittent arc grounding. Then an example is given and validated by EMTP simulation. The results show that the presented design is reasonable and feasible.

Key words: petersen-coil automatic compensation equipment; thyristor-controlled Reactor(TCR); transient state performance; EMTP simulation

本刊全体同仁祝全国广大读者春节愉快、万事如意!