

文章编号:1000-582X(2003)01-0122-04

一种新型可连续调节的消弧线圈

刘和平, 邓力, 江渝, 冉立, 叶一麟

(重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:采用可连续调节的消弧线圈不仅解决了高压电感调节系统的价格昂贵和调节系统十分复杂的问题,还可以使经消弧线圈接地系统的优越性充分发挥。文中着重介绍了如何采用低耐压的晶闸管连续调节6~66 kV的消弧线圈的一种新方法。对新型消弧线圈的电感调节量的计算进行了理论推导,并对其产生的稳态电流谐波分量进行了分析,用Saber软件对所设计的消弧线圈的理论依据进行了仿真实验验证和实物实验验证。

关键词:连续调节;消弧线圈;晶闸管

中图分类号:TM41

文献标识码:A

小电流接地系统发生单相接地后,系统的线电压仍保持对称,电网的工作条件没被破坏^[1],为了提高系统供电的可靠性,在中、低压配电系统(6~66 kV)中广泛采用小电流接地系统。但是,近年来随着城市配电网的扩大和电缆线路的广泛使用,系统对地电容电流将大幅度增加,曾经被广泛采用的中性点不接地方式将被取代,而中性点经过消弧线圈接地逐渐成为首选方式。然而由于传统消弧线圈的调节方式为离线调节,这使得系统的调谐和选线非常困难,为了解决这些问题,近年来出现了一些在线调节的消弧线圈,但它们都存在许多问题。如:有源调载消弧线圈,它可以实现电感的在线调节,但它电感的变化是非连续的,且随着调节次数的增加其运行变得不可靠,据有关资料表明,在1年中消弧线圈的调节次数在2000次以上;气隙式消弧线圈,从原理上讲它能实现电感的连续调节,但在实际中存在许多问题,例如故障电流所产生的磁场力足可以将铁心吸住,这将使该装置不能继续跟踪补偿接地电容电流;调匝式消弧线圈的电感不能实现连续调节,这就使得系统不能工作于最佳补偿状态;直流助磁式消弧线圈需要附加一个电源,其能耗大,控制复杂,长时间强励会使铁心过热;等等。因此消弧线圈是制约配电系统自动化的一个关键设备^[2-4]。

由于电力电子技术的发展,并广泛的应用于现代电力系统中,使得电力控制系统的发展进入了一个崭

新阶段,也使得一种新型的可连续调节的消弧线圈的产生成为可能。提出一种新型可连续调节的消弧线圈,它是应用电力电子技术,利用晶闸管在相位控制方式下,就可以完成其电感量的快速连续调节,而且只需采用单只常规耐压的晶闸管来承受高电压。针对这种高压可控消弧线圈的新型调节方法,对其在特殊的开关状态下的非线性控制所引起的可连续调节消弧线圈中流过的稳态电流谐波的大小进行了理论分析。当晶闸管在相位控制方式下时,文中还对这种消弧线圈的调节范围和其产生的谐波间所存在的约束关系进行了充分的讨论。

1 消弧线圈的工作原理

消弧线圈设计的示意图如图1所示,消弧线圈的原边绕组用 n_0 表示,消弧线圈的副边绕组用 n_1 表示。消弧线圈的原、副边绕组是绕在同一封闭的磁路上的,且磁路中存在气隙,消弧线圈原边接入电网的高压侧,副边接一个双向晶闸管。当晶闸管被关断时,副边绕组中没有电流流过,副边相当于开路,只有原边线圈绕组的电感量;当晶闸管导通时,副边绕组两端相当于短接,副边绕组中有电流通过,原边绕组两端等效电感量将会被改变。若调节晶闸管的触发控制角可以改变副边在半个工频周期内的导通与关断比例,以得到消弧线圈原边绕组两端的等效电感量从最大的电感量

· 收稿日期:2002-10-25

作者简介:刘和平(1957-),男,河南南阳人,重庆大学教授,硕士。主要从事微处理器、DSP和工业控制计算机在电力系统和传动系统中的应用。

调节到最小的电感量之间的连续变化。如果晶闸管一直工作在某一个触发控制角时，消弧线圈副边绕组工作于开路和短接交替的稳定状态，可以从消弧线圈的原边绕组两端得到一个等效的工频基波电感，这个基波等效电感的变化随着晶闸管触发控制角的变化而变化，这样就可以实现电感量的快速连续调节了。

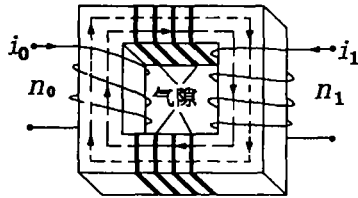


图 1 消弧线圈结构示意图

图 1 所示的快速消弧线圈，其消弧线圈原边绕组、副边绕组不仅存在自感，原边绕组与副边绕组之间还存在着互感。为了分析简化方便，忽略磁路的非线性、绕组的分布、电容的影响、磁路的激磁损耗和绕组的绕线电阻等因素的影响，将消弧线圈用等效的电感 L_0 、 L_1 和互感 M 表示，在消弧线圈线圈副边绕组接上晶闸管就构成了晶闸管控制消弧线圈的电路，电路模型如图 2 所示。图中， L_0 、 L_1 分别表示原副边绕组的自感，反映 L_0 和 L_1 之间的磁耦合程度用互感系数 M （也可用耦合系数 $K = \frac{M}{\sqrt{L_0 L_1}}$ ）表示。显然，经过简化后可以用 L_0 、 L_1 、 K 这组参数来描述快速调节式消弧线圈的电气性能，如图 2 所示。笔者以此电路模型进行理论分析。

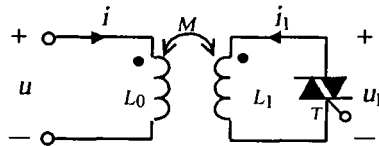


图 2 消弧线圈简化电路模型

若将晶闸管的触发控制角 δ ，在 $(0 \sim \pi)$ 区间内分为 3 个区间，且设消弧线圈原边绕组所施加的端电压 $u(t) = \sqrt{2} U_0 \cos \omega t$ ，则原边电流的方程如式(1)。

$$i(t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} U_0 \sin \omega t}{\omega L_0} & (0 \leq \omega t < \delta) \\ \frac{\sqrt{2} U_0}{\omega(1-K^2)L_0} \sin \omega t - \frac{\sqrt{2} U_0 K^2}{\omega(1-K^2)L_0} \sin \delta & (\delta \leq \omega t < \pi - \delta) \\ \frac{\sqrt{2} U_0 \sin \omega t}{\omega L_0} & (\pi - \delta \leq \omega t < \pi) \end{cases} \quad (1)$$

显然，当晶闸管在相控方式下，流过消弧线圈原边绕组的电流 $i(t)$ 会发生畸变，其电流曲线如图 3 所示，为奇谐波对称曲线。因此消弧线圈原边绕组电流中只含有奇次谐波的电流分量，通过对消弧线圈原边绕组中的电流进行傅立叶级数分解可求出其基波和高次谐波分量，由此可以了解电流的畸变情况。

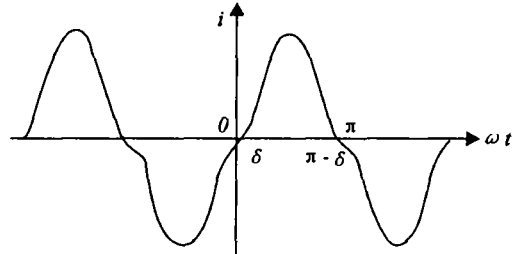


图 3 原边绕组电流波形图

对式(1)进行傅立叶级数分析，可得基波、3 次谐波和 5 次谐波分量的幅值 I_{1m} 、 I_{3m} 、 I_{5m} ，其表达式分别为(2)、(3)、(4)式。公式表明谐波的大小不仅与晶闸管的控制角 δ 有关，还与消弧线圈线圈耦合系数 K 以及原边线圈的电感量 L_0 有关。与副边线圈的电感量无关。

$$I_{1m} = \frac{\sqrt{2} U_0}{\omega(1-K^2)L_0} \left(1 - \frac{2K^2\delta}{\pi} - \frac{K^2}{\pi} \sin 2\delta \right) \quad (2)$$

$$I_{3m} = \frac{\sqrt{2} U_0}{\pi \omega L_0} \frac{K^2}{(1-K^2)} \cdot \left(-\frac{4}{3} \sin 4\delta \cos 3\delta - \sin 2\delta + \frac{1}{2} \sin 4\delta \right) \quad (3)$$

$$I_{5m} = \frac{\sqrt{2} U_0}{\pi \omega L_0} \frac{K^2}{(1-K^2)} \left(-\frac{1}{2} \sin 4\delta + \frac{1}{3} \sin \delta \cos 5\delta \right) \quad (4)$$

对(2)式求导可得： $\frac{dI_{1m}}{d\delta} = -\frac{2\sqrt{2} U_0}{\omega \pi} (1 + \cos 2\delta)$ 。因此，当晶闸管的触发控制角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时，不会出现导数为零的点。由此表明：随晶闸管的触发控制角 δ 的变化，消弧线圈原边绕组中的基波电流将单调变化，即电感线圈的基波等效电感，随晶闸管的触发控制角变化而单值连续变化。当 $\delta = 90^\circ$ 时，流过消弧线圈原边绕组基波电流为最小 $I_{\min} = \frac{\sqrt{2} U_0}{\omega L_0}$ ，消弧线圈原边绕组的基波等效电感量为最大值 $L_{\max} = L_0$ (L_0 表示电感线圈原边绕组的自感)；当 $\delta = 0^\circ$ 时，流过消弧线圈原边绕组基波电流为最大 $I_{\max} = \frac{\sqrt{2} U_0}{\omega L_0 (1-K^2)}$ ，消弧线圈原边绕组的基波等效电感量为最小值 $L_{\min} = (1-K^2)L_0$ 。

分析表明图 1 结构的消弧线圈在晶闸管的控制范围内具有单调连续变化的性质。晶闸管的相控在每半个电源周波内改变 1 次,相对于机械式有载开关调抽头来改变电感量是一种可快速连续调节电感量的方法^[5]。其消弧线圈的调节范围为:

$$\alpha_1 = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max}} = \frac{L_0 - (1 - K^2)L_0}{L_0} = K^2 \quad (5)$$

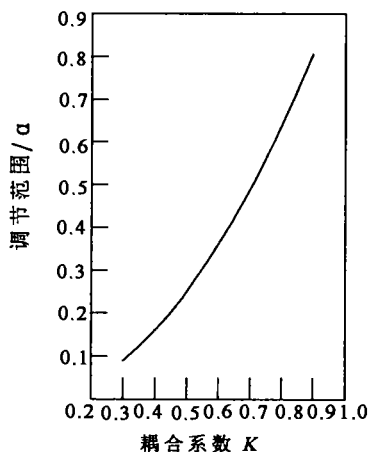
显然,消弧线圈的可调节范围取决于消弧线圈原副边的耦合系数,与原副边的电感量大小无关。但当电感调节范围设为 1 ($K = 1$) 时,如果副边一旦短接,原边的等效阻抗为零,则原边绕组相当于短路,这与变压器副边短路的工作情况类似,所以电感调节范围不可取为 1。

2 消弧线圈仿真分析

在 Saber 软件中建立一个如图 2 所示结构的消弧线圈模型,在消弧线圈的原边接入一个幅值为 8.57 kV (10 kV 系统,增加 5% 的值)的正弦电源。设定消弧线圈的原边电感量为 $L_0 = 0.9$ H,副边电感量为 $L_1 = 0.4$ H。

根据上述理论推导可知,副边绕组的电感量的大小对电感调节范围和 THD 值无影响。副边电感量仅对晶闸管的端电压有影响,其电感量 L_1 越小晶闸管的过电压越小,因此用减小副边电感量的方法来抑制过电压的值是非常有效的。

首先,把耦合系数设定为某一值时,改变晶闸管的控制角 δ ,把晶闸管从全导通调到全关断,便可以获得消弧线圈原边电流的最大值和最小值。这样就可以求得该消弧线圈在该耦合系数下的调节范围。图 4 为在可控电感线圈中取不同 K 值时电感量调节范围的仿真结果。



注:电感量调节范围的实验值,仿真值均以 $\alpha = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}$ 式计算。

图 4 K 与 α 的关系

由上述仿真值可得出,消弧线圈的调节范围与线圈的耦合系数 K 有关,且 K 值越大,调节范围越大,但原边的短路电流也越大。

仍采用图 2 的模型,当晶闸管处于不同控制角 δ 下,就可以获得消弧线圈原边电流的谐波与耦合系数 K 的关系。用 Saber 软件对电路模型仿真得到消弧线圈原边电流的谐波的 THD 值随控制角 δ 变化的情况,用于反映消弧线圈电流畸变程度。

由图 5 可知,在相同耦合系数的条件下,反映可控消弧线圈电流畸变程度的 THD 是随控制角的变化而变化,这一仿真结论与前面的理论分析结果一致。由以上仿真值可看出,随着耦合系数 K 的增大,消弧线圈原边电流的谐波的 THD 值也在增加。当 K 一定时,导通角 $\delta = 45^\circ$ 时 THD 值最大。

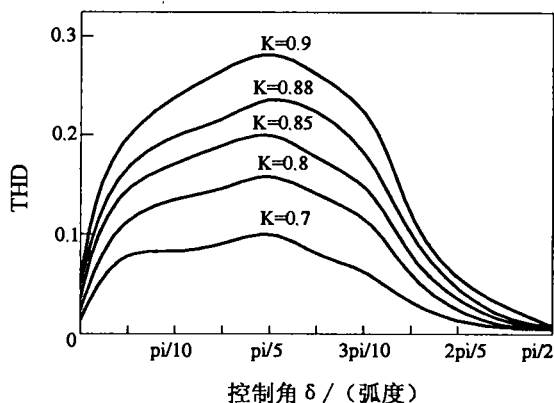


图 5 THD 与耦合系数 K 的关系

注:THD 为谐波畸变因子,定义为 $THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{nm}^2}}{I_{1m}}$ 。

3 实际消弧线圈的设计

实际消弧线圈的参数设计原则是按消弧线圈能够补偿的电流范围在 20 ~ 110 A 之间,同时还综合考虑了调节范围和 THD 值两方面因素,根据仿真结果,按 K 近似等于 0.9 设计。

设计一个可调节消弧线圈,其实际结构采用消弧线圈的原、副边绕组是绕在同一段铁心上的同心绕组。消弧线圈的原边绕组(高压绕组)的直径为 350 mm,匝数为 455;副边绕组(低压绕组)的直径为 170 mm,匝数为 220。高、低压绕组间是风道,消弧线圈铁心为圆形,直径为 65 mm,铁心的长度为 2.1 m。在绕组所缠绕的那段铁心内有 2.6 cm 长的气隙。下面是该消弧线圈的 Saber 仿真模型的仿真值与该消弧线圈实际实验值的比较。

表 1 消弧线圈副边开路原边施加电压的实验仿真数据

原边电压值/V	原边电流(实验值)/A	原边电流(仿真值)/A	副边电压(实验值)/V	副边电压(仿真值)/V
2 020	38.31	40.716	803.6	825.4
2 452	46.59	48.64	975.1	1 034.3

表 2 消弧线圈原边开路副边施加电压的实验仿真数据

副边电压值/V	副边电流(实验值)/A	副边电流(仿真值)/A	原边电压(实验值)/V	原边电压(仿真值)/V
601.3	57.37	55.497	1 206	1 235
499.9	47.7	45.7	1 002	1 008.7
401.4	38.31	36.81	806	808.98

表 3 消弧线圈副边短路原边施加电压的实验仿真数据

原边电压值/V	原边电流(实验值)/A	原边电流(仿真值)/A	副边电流(实验值)/V	副边电流(仿真值)/V
533.2	49.86	50.834	99.81	102.44
418.6	39.1	38.465	78.29	78.273
336.5	31.4	30.924	62.98	62.92

表 4 消弧线圈原边短路副边施加电压的实验仿真数据

副边电压值/V	副边电流(实验值)/A	副边电流(仿真值)/A	原边电流(实验值)/V	原边电流(仿真值)/V
229.87	108.23	104.03	43.05	42.978
200.28	94.29	91.35	37.5	37.45

从上面的数据可知,采用上述模型完全能够设计出满意的消弧线圈。

4 结 论

由于采用图 1 结构的电感线圈,副边绕组匝数很少,使得副边绕组的电流较大,而两端的电压较低,采用常规的可控元件即可控制用于高电压等级电网系统

中消弧线圈。文中对设计消弧线圈进行了理论分析和 Saber 软件仿真及实物验证后,可以得出如下结论:工作于相控方式下的晶闸管与特殊设计的消弧线圈连接可以达到使消弧线圈电感量连续调节的目的。

应用电力电子技术低价格地实现了一种在高压环境中使用的消弧线圈,这种可控的消弧线圈在晶闸管相位控制方式下可以完成其电感量的快速调节,而且只需采用单只常规耐压的晶闸管来承受高电压。这种消弧线圈的实现可以用作电网中性点经消弧线圈接地系统中的消弧线圈和作为静止无功补偿中的消弧线圈使用等等。

参考文献:

- [1] 周荣光. 电力系统故障分析[M]. 北京:清华大学出版社.
- [2] GULACHENSKI E M. New England Electric's 39 Years of Experience With Resonant Neutral Grounding of Unit-connected Generators[J]. IEEE Trans, 1991, 6(3): 1 016 - 1 020.
- [3] 天晴. 大功率晶闸管的研制和应用[J]. 世界电力消息, 1990, (7): 21 - 23.
- [4] GULACHENSKI E M. New England Electric's 39 Years of Experience With Resonant Neutral Grounding of Unit-connected Generators[J]. IEEE Trans, 1991, 6(3): 1 016 - 1 020.
- [5] 徐玉琴. 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, 25(13): 38.
- [6] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术[M]. 北京:机械工业出版社.

A Novel Adjustable Peterson Coil

LIU He - ping, DENG Li, JIANG Yu, RAN Li, YE Yi - lin

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing 400044, China)

Abstract: The paper presents a novel continuously adjustable Peterson coil. If it is used in the system of neutral point grounding through Peterson coil, not only the high-price can be reduced and the complicated problems can be solved of which the high voltage inductance controlling systems, but also advantages of the system of neutral point grounding though Peterson coil can be shown. It introduces that how adopts low voltage thyristors for continuing adjusting inductance of the Peterson coil of which the voltage level ranges from 6 kV to 66 kV. This paper discusses the formula of calculating the inductance variable ranges and the harmonic currents which presents stable harmonic current under the phase-controlled mode also. The theory of the designing coil is verified by the Saber simulation and practicality experiment.

Key words: continuously adjustable; Peterson coil; thyristor

(责任编辑 陈移峰)