

五种纵向磁场真空灭弧室触头磁场特性分析比较

王仲奕, 刘志远, 张 炫, 王季梅

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 用三维有限元法研究了线圈、杯状、两极和四极及双线圈五种纵磁真空灭弧室触头的纵向磁感应强度分布、触头片上涡流分布和纵向磁场滞后时间。研究表明:(1) 电流峰值时纵向磁场由强到弱依次排列为:线圈式触头、两极式结构、双线圈式触头、杯状和四极式触头;(2) 电流过零时剩余磁场由弱到强依次为:四极式触头、两极式触头、杯状触头、双线圈式触头和线圈式触头;(3) 纵向磁场较强处滞后时间由小到大依次为:两极式触头、四极式触头、线圈式触头、双线圈式触头和杯状纵磁触头。

关键词: 真空灭弧室; 纵向磁场; 真空电弧

中图分类号: TM561

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2006)01-0021-05

1 引言

真空断路器的最主要性能参数是极限短路电流开断能力。一般来说,真空开关在开断大电流的过程中如电弧的收缩形成阳极斑点,就可认为真空开关的开断能力已达到了极限。阳极斑点的出现是由于弧柱在阳极表面收缩导致电流密度和电子饱和电流密度之比过高,使电弧电压高而不稳定^[1]。在真空灭弧室中使用纵向磁场电弧控制技术来提高其开断能力主要在于:1) 使真空电弧在大电流下仍处于扩散状态,大大减轻对触头表面局部的烧蚀,从而减小电流过零后触头表面向弧隙中的蒸发,使介质恢复速度快;2) 使电弧电压保持在较低水平,从而使得真空电弧的电弧能量小。

采用纵向磁场电弧控制技术的真空灭弧室中,在触头拉开的过程中纵向磁场是电流流经触头产生的,因此触头的设计对纵向磁场分布有密切影响。实际应用中比较常见的纵向磁场真空灭弧室触头有线圈^[2]和杯状纵磁触头^[3],还有两极式和四极式纵磁触头^[4,5],以及日本东芝公司的自生电弧扩散电极(SADE—Self Arc Diffusion by Electrode)^[6,7]。本文对前4种纵磁触头和根据自生电弧扩散电极原理设计

的双线圈纵磁触头的纵向磁场特性进行三维涡流场有限元分析并进行比较。在触头中还可以加入铁磁物质来增强纵向磁场,比如马蹄铁式纵磁电极和铁芯式四极电极^[8]、以及铁芯式两极纵磁电极等^[9]。

2 电极结构模型

本文采用的比较模型如图1所示,分别是1/2匝线圈结构、4杯指杯状结构、两极式和四极式纵磁触头结构,以及根据SADE电极的原理设计的一种双线圈纵磁结构触头。杯状纵磁触头结构中杯指旋转角取90°,与水平夹角为21°;两极式纵磁触头上下两拐臂取180°放置;四极式纵磁触头上下两拐臂取90°放置;双线圈纵磁结构在1/2匝线圈纵磁触头结构的内部设置了一个小线圈,其电流方向与外部大线圈的电流方向相反,从而两线圈产生的纵向磁场方向也互为反向。

以上5种纵磁触头均取直径60mm,开距10mm,触头片厚3mm。双线圈结构触头片上开有6个径向直槽,其他四种结构触头片上均开有4个径向直槽。采用Ansoft公司Maxwell 3D电磁场有限元软件对各触头的磁场特性进行分析,包括电流峰值时纵向磁感应强度的分布,电流过零时纵向磁感应强度的分

收稿日期:2005-09-02

基金项目:西安交通大学校基金资助项目(xjj2003005)

作者简介:王仲奕(1956-),女,山东籍,副教授,博士,主攻电磁场理论及应用研究;

刘志远(1971-),男,辽宁籍,讲师,博士,主攻真空电弧理论及其应用。

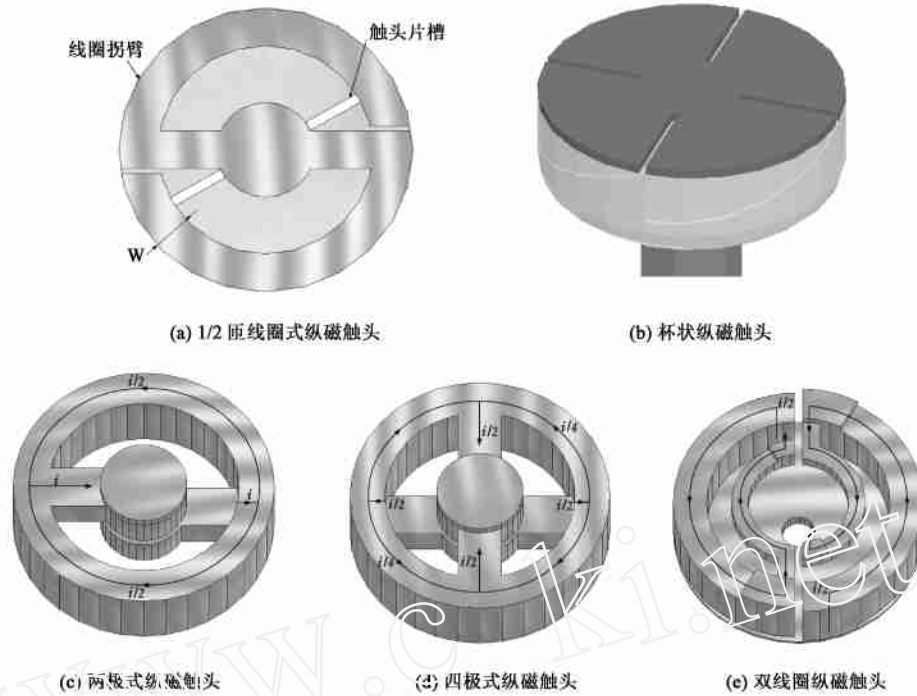


图 1 五种纵向磁场触头模型

Fig. 1 5 Models of axial magnetic field vacuum interrupter contacts

布以及纵向磁场滞后时间。计算结果为频率 50Hz 每 kA 短路电流下得到的值。计算中取触头材料电导率为 $1.044 \times 10^7 \text{ S/m}$ (CuCr50)。取电弧模型为圆柱形,直径与触头直径相同,高与触头开距相同,电导率为 2000 S/m 。计算场域为模型的 10 倍,在软件中设定计算能量误差判据小于 1% 时计算终止。

3 计算结果

3.1 电流峰值时纵向磁感应强度分布

图 2 为电流峰值时各触头在开距中心平面上纵向磁感应强度的分布。由图可知,线圈结构的纵向磁场分布有明显的两个峰值区域,其最大值约为

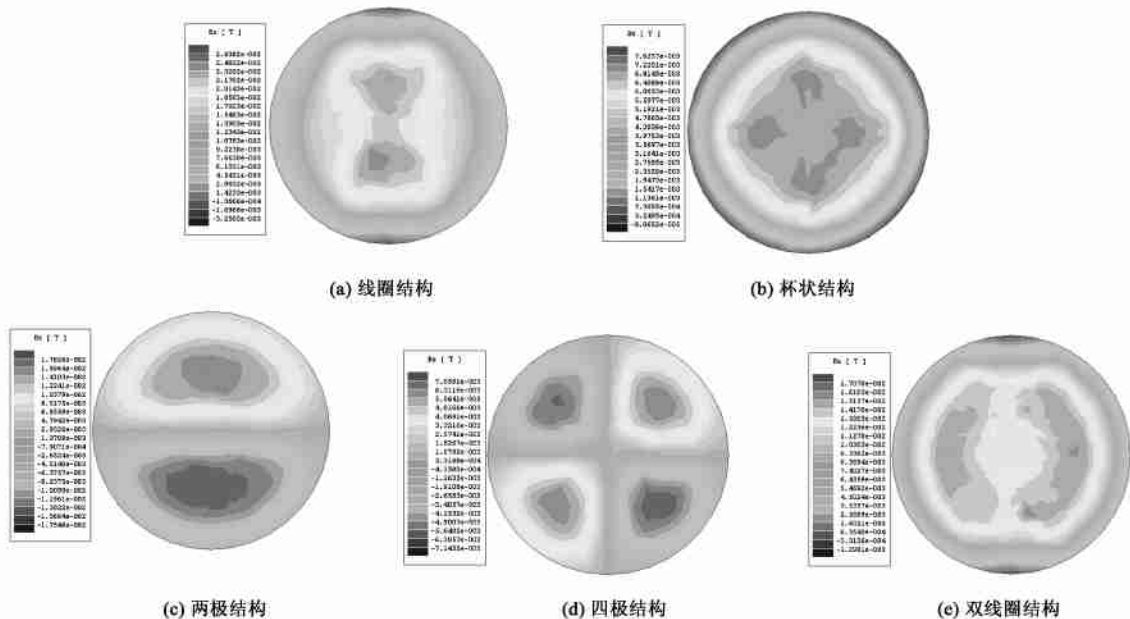


图 2 电流峰值时各触头在开距中心平面的纵向磁感应强度分布

Fig. 2 Distributions of axial magnetic flux density on middle plane of contact gap with 5 kinds of contacts at current peak

26.4mT,为五种触头结构中最强的纵向磁场。杯状结构的纵向磁场分布有四个峰值区域,分别对应着触头片上开槽的位置,最大值约为7.6mT,纵向磁场在触头中心部分分布较为均匀,在触头外沿很快衰减。两极结构的纵向磁场分布为两个大小相同,方向相反的区域,最大值约为17.8mT,由于产生的两个纵向磁场方向相反,在其交界部分相互抵消,因此在触头中心部分的纵向磁场非常弱。四极结构触头的纵向磁场分布为四个大小相同,方向互为相反的区域,最大值约为7.1mT,在四个纵向磁场交界部分的纵向磁场非常弱。双线圈结构的纵向磁场在触头半径约1/2处有两个较大的峰值区域,最大值约为17.1mT,纵向磁场在触头外沿的衰减较小。

3.2 电流过零时纵向磁感应强度 B_{z0} 分布

图3为电流过零时各触头在开距中心平面上纵向磁感应强度 B_{z0} 的分布。由图可知,线圈结构的 B_{z0} 分布在触头中心处有一峰值区域,沿触头径向减小,其最大值约为2.73mT。杯状结构的 B_{z0} 分布受触头片开槽的影响,在对应开槽处减小得较快,在槽与槽之间的部分减小得较慢,其 B_{z0} 最大值约为1.86mT。两极结构的 B_{z0} 分布同样也受到了开槽的影响,使得本应有两个峰值区域的 B_{z0} 分布分为四个峰值区域,但由于产生的纵向磁场相互抵消,其 B_{z0} 非常小,最大值约为0.56mT。四极结构的 B_{z0} 分布类似于两极结构,只是产生的 B_{z0} 方向互为相反,其

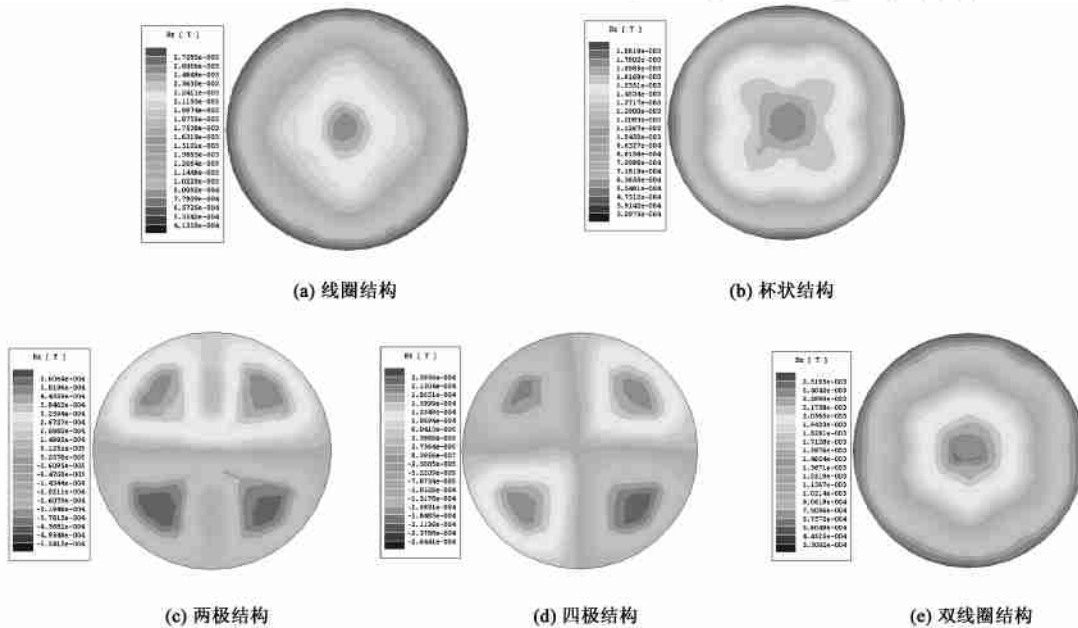


图3 电流过零时各触头在开距中心平面的纵向磁感应强度分布

Fig. 3 Distributions of axial magnetic flux density on middle plane of contact gap with 5 kinds of contacts at current zero

最大值仅为0.26mT。双线圈结构的 B_{z0} 分布与杯状结构类似,但在触头径向上减小得更快一些,其 B_{z0} 最大值约为2.52mT。

3.3 纵向磁场滞后时间 T

图4为各触头纵向磁场滞后时间 T 在开距中心平面沿过 B_z 峰值的一径向直线上的分布。由图可知,线圈结构的 T 在触头半径22mm内的区域变化不大,在0.3ms至0.4ms之间波动, T 在半径22mm外的区域变化范围为-0.4ms~0.7ms。杯状结构的 T 在触头中心处约为0.8ms,而后沿着触头径向逐渐减小,当超过触头半径为26mm的区域时, T 迅速增加至2.8ms。两极结构的 T 在触头中心处约为

0.16ms,在触头半径为15mm处纵向磁场滞后时间约0.01ms,在触头半径大于15mm的区域内 T 沿着触头径向逐渐增大。四极结构的 T 在触头中心部分变化剧烈,尤其是在触头中心点附近, T 由-0.05ms突然变化至0.36ms,在大于触头半径10mm的区域内, T 沿着触头径向在0.1ms左右波动。双线圈结构的 T 在触头半径5mm的范围内较大,并沿着触头径向减小,在触头半径22mm处达到最小值,约为0.24ms,而后逐渐增大至0.39ms。

4 讨论

(1) 一个好的触头结构可以产生强的纵向磁

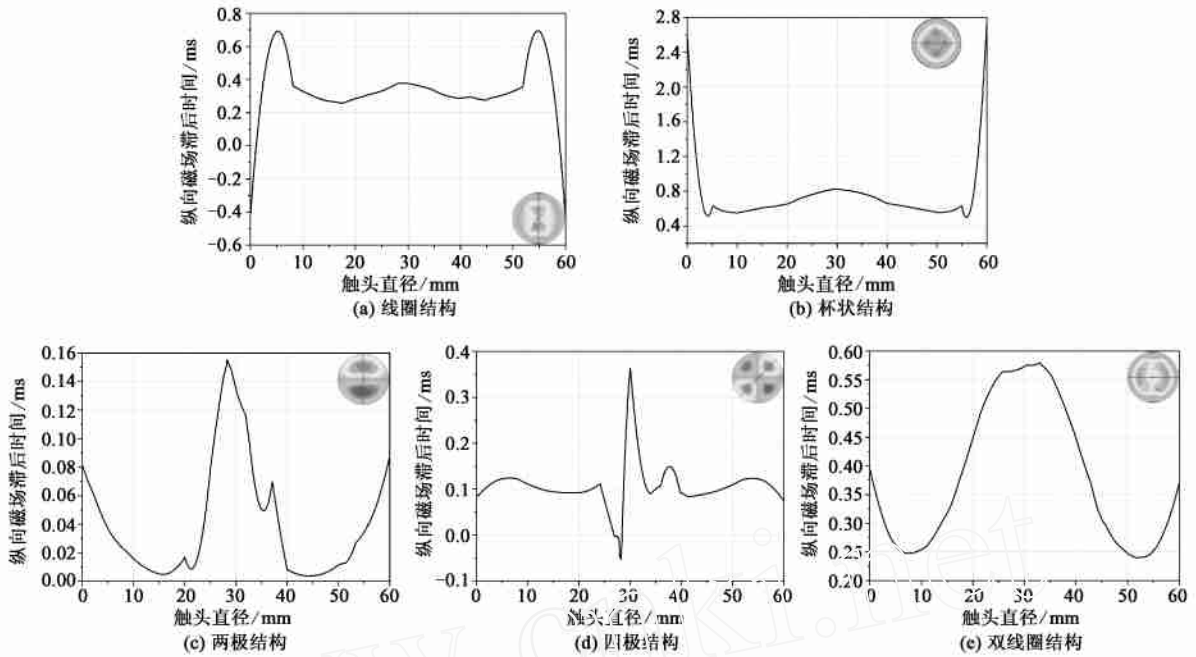


图 4 各触头纵向磁场滞后时间沿开距中心平面径向分布曲线

Fig. 4 Distribution of phase shift time on a line on middle plane of contact gap with 5 kinds of contacts

场。由图 2 的计算结果可知,电流峰值时纵向磁场由强到弱依次排列为:1/2 匝线圈结构 (26.4mT)、两极式 (17.8mT)、双线圈式结构 (17.1mT)、杯状结构 (7.6mT)和四极式结构 (7.1mT)。这是由触头结构对电流的控制方式不同所造成的,1/2 匝线圈、两极

式以及双线圈结构每拐臂中的电流均为源电流的 1/2,四极式和杯状结构每拐臂中的电流只有源电流的 1/4,因此后两者产生的纵向磁场弱得多。由于两极式触头的电流输入和输出拐臂共用同一线圈,双线圈触头内部的小线圈对大线圈有分流作用,因此

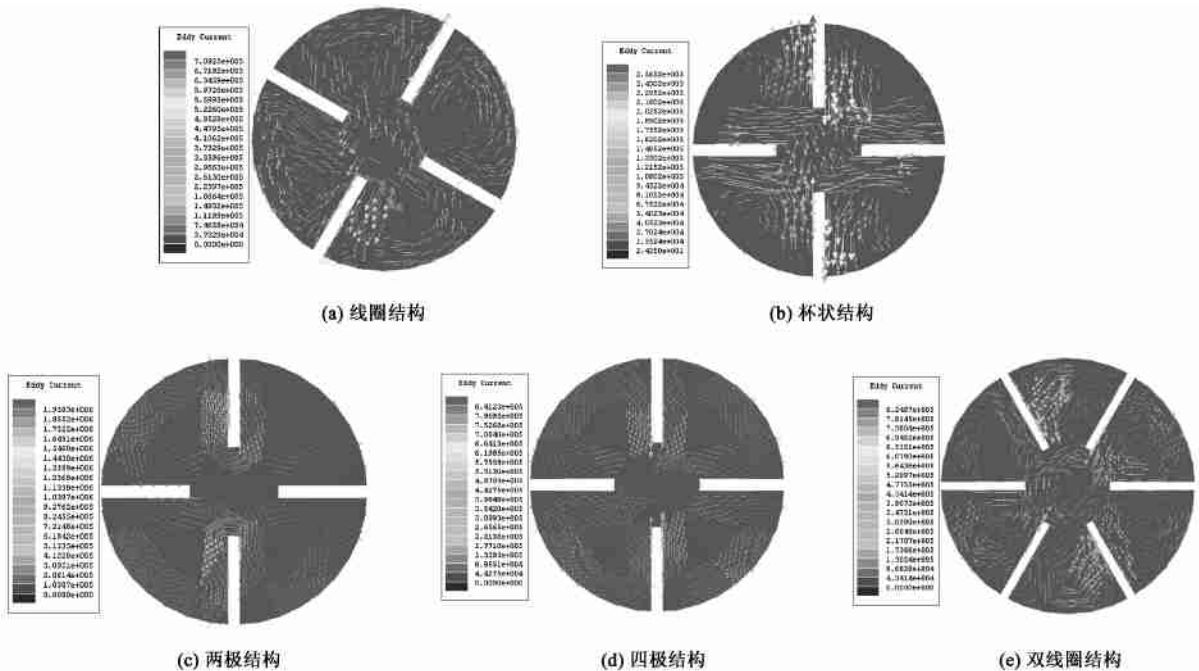


图 5 触头片上的涡流分布

Fig. 5 Distribution of eddy current in contact plates with 5 kinds of contacts

这两种触头结构产生的纵向磁场又要比 1/2 匝线圈弱一些。

(2) 触头在电流过零时的剩余纵向磁场 B_{z0} 由涡流产生,若 B_{z0} 过大,将阻止熄弧后的残余等离子体向四周扩散,妨碍弧后介质强度的恢复。一个性能优越的纵磁触头应当具有尽可能小的剩余纵向磁场。由图 3 可知,剩余纵向磁场由弱到强依次为:四极式 (0.26mT)、两极式 (0.56mT)、杯状结构 (1.86mT)、双线圈式结构 (2.52mT) 和 1/2 匝线圈结构 (2.73mT)。从图 5 的触头片中涡流分布来看,四极式和两极式触头由于产生反向的涡流,因此开距中心平面 B_{z0} 最大值较小,仅为 0.26mT 和 0.56mT; 由于杯状触头、线圈式和双线圈式结构都是单极结构,因此这三种触头都具有类似的涡流分布。杯状触头的触头片中涡流较弱,为 $2.6e5A/m^2$,因此 B_{z0} 比线圈式触头和双线圈式触头的 B_{z0} 低。线圈式触头和双线圈触头的触头片中涡流大小相近,分别为

$7.1e5A/m^2$ 和 $8.2e5A/m^2$,均大于杯状触头,因此其 B_{z0} 相差不多,双线圈式触头的 B_{z0} 为 2.52mT,1/2 匝线圈触头的 B_{z0} 为 2.73mT,其差异是由开槽数目造成的。

(3) 一个好的触头结构应具有较小的纵向磁场滞后时间。由图 4 可知,在纵向磁场较强处五种触头的纵向磁场滞后时间 T 由小到大依次为:两极式 (0.01ms)、四极式 (约 0.1ms)、1/2 匝线圈式 (约 0.3ms)、双线圈式 (约 0.3ms) 和杯状纵磁触头结构 (约 0.8ms)。两极式与四极式触头的 T 非常小,因为多极式触头产生的涡流可相互抵消,如由图 5 所示。双线圈结构的纵磁滞后时间分布与线圈结构不同,但在纵向磁场较强处两种线圈结构相近,约 0.3ms,并且两种线圈式触头的 T 都小于杯状触头的纵磁滞后时间。

(4) 五种纵向磁场触头纵向磁场特性的优缺点比较:

触头结构		优点	缺点
单极式触头	1/2 匝线圈触头	纵向磁场强,有利于控制真空电弧	电流过零时剩余纵向磁场强,不利于带电粒子的扩散;加工成本高,回路电阻大
	杯状纵磁触头	纵向磁场强度适中,分布较均匀;易于加工,适合于批量生产	纵向磁场较强处滞后时间较长
	双线圈触头	纵向磁场强度适中,分布较均匀	加工成本高,回路电阻大,纵向磁场较强处滞后时间较长
多极式触头	两极式触头	纵向磁场强,控制真空电弧能力强;纵向磁场滞后时间少;电流过零时接受任务剩余纵向磁场弱;适合于中压大容量开断场合	加工成本高
	四极式触头	纵向磁场滞后时间少;电流过零时剩余纵向磁场弱,带电粒子扩散快	加工成本高;纵向磁场不够强,可考虑采用四极铁芯式结构

5 结论

在本文所研究的 5 种纵向磁场真空灭弧室触头结构中,在所设定的结构参数下:

(1) 电流峰值时纵向磁场由强到弱依次排列为:1/2 匝线圈结构、两极式、双线圈式结构、杯状结构和四极式结构;

(2) 电流过零时剩余纵向磁场由弱到强依次为:四极式、两极式、杯状结构、双线圈式结构和 1/2 匝线圈结构;

(3) 纵向磁场较强处滞后时间 T 由小到大依次为:两极式、四极式、1/2 匝线圈式、双线圈式和杯状纵磁触头结构。

参考文献 (References):

[1] 王季梅,苑舜 (Wang Jimei, Yuan Shun). 大容量真空开关

理论及其产品开发 (Theory of high capacity vacuum switches and their development) [M]. 西安:西安交大出版社 (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 2001.

[2] Watanabe K, Kaneko E, Yanabu S. Technological progress of axial magnetic field vacuum Interrupter [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 1997, 25(4): 609-616.

[3] 刘志远,谢克松,王仲奕,等 (Liu Zhiyuan, Xie Kesong, Wang Zhongyi, et al.). 杯状纵磁真空灭弧室三维涡流场仿真 (Analysis of 3D eddy current field in cup-type axial magnetic field vacuum Interrupter) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2004, 23(2): 26-28.

[4] 刘东晖,修士新,王季梅 (Liu Donghui, Xiu Shixin, Wang Jimei). 两种新型的纵磁结构真空灭弧室的研究比较 (Study on comparison of two new AMF vacuum interrupter (下转第 67 页, cont. on p. 67))

Research on improved measure of MPPT control and its experiment in a grid-connected photovoltaic system

YANG Hai-zhu , JIN Xin-min

(School of Electrical Engineering , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)

Abstract: Maximum Power Point Tracking is one of the most important problems for the grid-connected photovoltaic system. According to the character of solar array and grid-connected inverter , an improved measure about intermittent scan MPPT method is proposed. Then a model of grid-connected inverter based on state-space average method is founded and a MPPT experiment is done. Through the result of simulation and MPPT experiment with inverter prototype , it is proved that the stability of system is greatly improved with the new MPPT control strategy.

Key words: solar energy ; grid-connected inverter ; MPPT ; state-space average method

(上接第 25 页, cont. from p. 25)

- contacts) [J]. 电工技术学报 (Trans. of China Electrotechnical Society) , 2003 , 8(6) : 68-71.
- [5] 刘东晖,王季梅 (Liu Donghui , Wang Jimei). 新型的 126kV 真空灭弧室电极结构的磁场计算及分析 (Calculation and analysis of AMF of new 126kV vacuum interrupter contacts) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy) , 2003 , 22(3) : 73-76.
- [6] M Homma , H Somei , Y Niwa , et al. Physical and theoretical aspects of a new vacuum arc control technology - self arc diffusion by electrode : SADE [J]. IEEE Trans. on Plasma Science , 1999 , 27(4) : 961-968.
- [7] 王季梅 (Wang Jimei). 一种能提高真空灭弧室开断能力的自生电弧扩散电极 (SADE) (A self-arc diffusion electrode enhancing interrupting capacity of vacuum interrupters) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus) , 1998 , (1) : 44-46.
- [8] Shang W , Schellekens H , Hilderink J. Experimental investigations into the arc properties of vacuum interrupters with horseshoe electrode , four pole electrode and their applications [J]. IEEE Trans. Plasma Science , 1993 , 21 (5) : 474-477.
- [9] 刘志远,王季梅,王政,等 (Liu Zhiyuan , Wang Jimei , Wang Zheng , et al.). 铁芯式两极纵磁真空灭弧室三维静磁场有限元分析 (Analysis of static magnetic field of an iron style bipolar axialmagnetic field vacuum interrupter by 3D finite element method) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy) , 2001 , 20(1) : 35-38.

Comparison of axial magnetic field characteristics of 5 axial magnetic field vacuum interrupter contacts

WANG Zhong-yi , LIU Zhi-yuan , ZHANG Xuan , WANG Ji-me

(Department of Electrical Engineering , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an 710049 , China)

Abstract: Characteristics of axial magnetic field (AMF) of 5 kinds of vacuum interrupter contacts were studied with 3D finite element method , which included characteristics of AMF , eddy current in contact plates and phase shift time. The 5 AMF vacuum interrupter contacts include coil type , cup type , bipolar type , quadrapolar type and two coils type. The results showed that (1) from strong AMF to weak one generated by current , axial magnetic flux density at current peak followed with the order of coil type , bipolar type , two coils type , cup type and quadrapolar type ; (2) from weak AMF to strong one at current zero , the order was quadrapolar type , bipolar type , cup type , two coils type and coil type ; (3) from short phase shift time to long one at strong AMF , the order was bipolar type , quadrapolar type , coil type , two coils type and cup type.

Key words: vacuum interrupter ; axial magnetic field ; vacuum arc