

磁集成结构变压器式可控电抗器的对比分析及设计

田铭兴^{1,2}, 王田戈^{1,2}, 马长立^{1,2}, 张子麒^{1,2}

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:通过对比分析现有阵列式结构、多导磁材料结构、分裂式结构和多基本独立单元结构的磁集成变压器式可控电抗器(CRT)的结构特点,提出了多控制绕组基本单元磁集成CRT的结构设计原则。根据该设计原则,提出了一种新型磁集成CRT,即双控制绕组基本单元磁集成CRT。同时,为了说明这种新型磁集成CRT的优越性,将其与现有磁集成CRT在体积、重量、结构复杂度等方面进行对比分析。结果表明,双控制绕组基本单元磁集成CRT不仅能够满足CRT“高阻抗”与“弱耦合”的设计要求,而且具有体积小、重量轻和结构简单等明显优势。

关键词:变压器式可控电抗器;磁集成结构;设计原则;对比分析

中图分类号:TM 47

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.030

0 引言

随着用电负荷的快速增长以及大容量输电需求的增加,为了提高电网的输电能力,超/特高压、长距离输电成为目前输电技术的重要发展方向^[1]。无功平衡和电压控制是电力系统安全可靠、经济优质运行的重要保证,对超/特高压输电线路的稳定运行至关重要^[2]。变压器式可控电抗器 CRT (Controllable Reactor of Transformer type) 是具有响应速度快、容量连续可控且电流谐波小等优点的新型可控电抗器,在补偿线路容量无功、限制工频过电压等方面发挥着重要作用^[3-6]。

CRT 的本质是具有高短路阻抗且工作于分级短路状态的多绕组变压器^[7-8],但与多绕组变压器不同的是:CRT 的正常工作状态为短路状态,即短路状态为额定状态。为了使 CRT 的短路电流维持在额定值,需使其短路阻抗达到 100%。目前,限制变压器短路电流有 2 种途径:串联限流电抗器和采用高阻抗变压器。对于 CRT 而言,通常采用在控制绕组回路串联限流电抗器的方式来提高短路阻抗,但这种方式增加了 CRT 体积、重量及成本,且控制绕组之间还存在着严重的磁耦合。磁集成技术在电力电子装置中的应用能够实现多个磁件集成,减小设备体积^[9-11]。将磁集成技术引入 CRT 的结构设计,可通过对铁芯的设计来实现 CRT 副边绕组与限流电抗

器的集成,从而减少限流电抗器的使用。

目前,磁集成 CRT 主要有阵列式结构、多导磁材料结构、分裂式结构以及多基本独立单元结构 4 种类型^[12-16]。这些结构虽都能满足 CRT 高阻抗、弱耦合的设计要求,但并非全都能实现空载到满载平滑可控的功能要求,且缺乏可遵循的结构设计原则。此外,目前磁集成结构的 CRT 大多存在结构复杂、工艺要求高、运行维护困难等问题^[12-15],大幅降低了其实用价值。文献[16]通过对漏磁芯柱的设置以及将控制绕组单元完全独立,实现了 CRT 本体结构的简化且提高了控制绕组容量利用率,但其多基本独立单元的特点无疑增加了铁磁材料及绕组材料的使用,造成 CRT 体积、重量及材料成本的增加。

因此,针对以上问题,本文对现有磁集成 CRT 的结构进行详细分析,总结在满足设计要求前提下,多控制绕组基本单元磁集成 CRT 的结构设计原则;基于该原则,提出 CRT 的新型磁集成结构,即双控制绕组基本单元磁集成 CRT;并与现有磁集成 CRT 在体积、重量、结构复杂度等多方面进行对比,以说明双控制绕组基本单元磁集成 CRT 的优越性与实用性。

1 磁集成 CRT 结构分析

1.1 阵列式磁集成 CRT

阵列式磁集成 CRT 通过对绕组进行合理的拆分与排布,使各控制绕组磁通彼此不相互影响,以实现 CRT 的弱耦合^[13]。该结构需根据具体绕组个数来对铁芯结构及绕组结构进行排布,因此不具有多绕组的通用性与拓展性。本文以三绕组阵列式磁集成 CRT 为例进行结构分析,其结构示意图如图 1 所示,其中 BW 为工作绕组, CW_m 为第 m 个控制绕组的第 n 段。对于具有 2 个控制绕组的阵列式磁集成 CRT,其由 2 个基本单元构成。从图 1 中可看出,阵

收稿日期:2017-12-21;修回日期:2018-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51167009,51367010);甘肃省科技计划项目(17JR5RA083);兰州交通大学优秀科研团队项目(201701)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51167009,51367010),the Science and Technology Program of Gansu Province(17JR5RA083) and the Program for Excellent Team of Scientific Research in Lanzhou Jiaotong University(201701)

列式磁集成 CRT 基本单元的铁芯结构特点是:控制绕组所在芯柱的相邻处并联低磁阻芯柱,为流过控制绕组的磁通提供一条额外的低磁阻磁路。其绕组特点是:工作绕组同时绕制在 2 个基本单元的侧柱,且将已拆分的不同控制绕组绕制在同一个铁芯柱上。由此可知,对于阵列式磁集成 CRT 的基本单元,其多个分段的控制绕组对应同一个低磁阻芯柱,即各控制绕组对应的低磁阻芯柱并不独立。

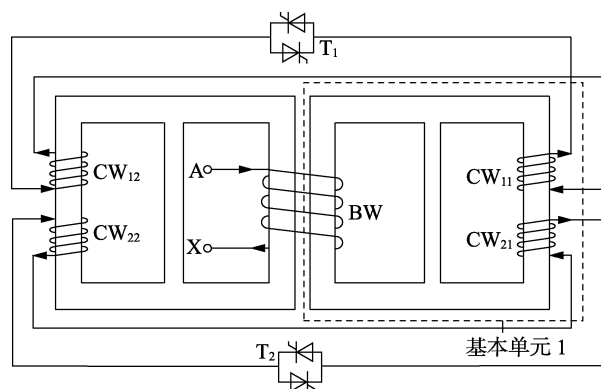


图 1 三绕组阵列式磁集成 CRT 结构示意图

Fig.1 Structure of three-winding array magnetic integrated CRT

由于控制绕组漏抗远远小于其自身的激磁阻抗,因此,在投入第一个控制绕组后,后续控制绕组的投入几乎不会改变工作绕组与控制绕组之间的等效短路阻抗,即 CRT 容量不会随着后续控制绕组的依次投入而逐渐增加。

由上述分析可说明,低磁阻芯柱不独立的特点尽管能够实现 CRT 的高阻抗,但在第一级控制绕组投入之后,CRT 的等效短路阻抗几乎不再发生变化,不能实现 CRT 容量从空载到满载的过渡。因此,该结构是不可行的。

1.2 多导磁材料磁集成 CRT

图 2 为多导磁材料磁集成 CRT 的结构示意图。图中,BW 为工作绕组,CW_k 为第 k 级控制绕组; μ_k 为 CW_k 对应的低磁阻芯柱所用铁磁材料的磁导率;s 为控制绕组的级数^[14]。由图 2 可知,多导磁材料磁集成 CRT 的铁芯结构特点是:每个控制绕组所在铁芯的相邻处并联一个低磁阻芯柱,并与控制绕组及其铁芯组成一个控制绕组单元;各控制绕组对应的低磁阻芯柱独立,且根据控制绕组容量的不同,低磁阻芯柱所用的铁磁材料不同;各控制绕组单元集成于同一铁芯结构。其绕组排布的特点是:工作绕组绕制在左侧柱且仅有 1 个;所有控制绕组均绕制在右侧柱,且各控制绕组单元采用相互串联的方式。该方式使控制绕组发生短路时,流过控制绕组所在铁芯的磁通只向该控制绕组对应的低磁阻芯柱转移,而不会对其他控制绕组所交链的磁通产生影响,从而使各控制绕组之间实现解耦。

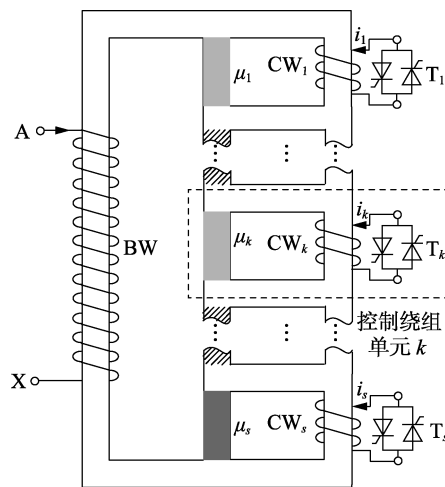


图 2 多导磁材料磁集成 CRT 结构示意图

Fig.2 Structure of variety magnetic material integrated CRT

多导磁材料磁集成 CRT 有效地将磁集成技术应用于 CRT 的结构设计,满足了 CRT 高阻抗和弱耦合的设计要求,减少了磁件的使用。但随着控制绕组容量的不同,其对应的低磁阻芯柱所采用的铁磁材料将不同,这对 CRT 的工艺制造提出了更高的要求。

1.3 分裂式磁集成 CRT

图 3 为分裂式磁集成 CRT 的结构示意图。图中,BW_k 为第 k 个工作绕组;CW_k 为第 k 个控制绕组; μ_k 为 CW_k 对应铁饼的磁导率^[15]。对于具有 s 级控制绕组的 CRT,该结构具有 s 个工作绕组。由图 3 可知,分裂式磁集成 CRT 的铁芯结构特点是:铁芯结构与绕组结构关于点画线对称;每个控制绕组单元由工作绕组、控制绕组与铁饼构成,铁饼作为与控

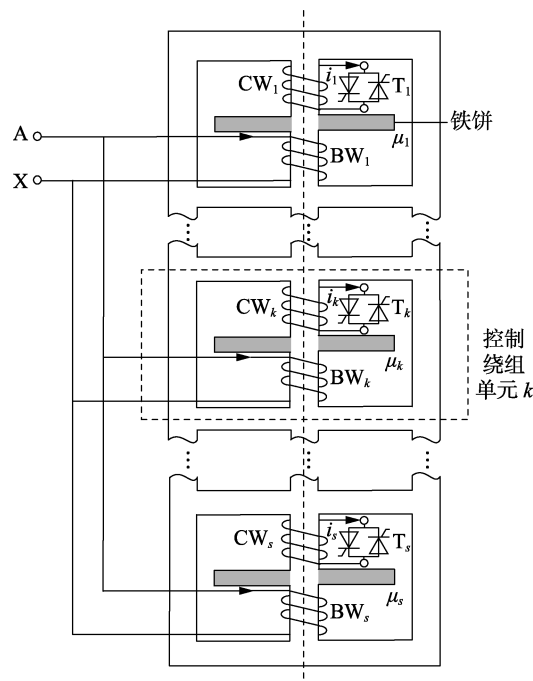


图 3 分裂式磁集成 CRT 结构示意图

Fig.3 Structure of split magnetic integrated CRT

制绕组对应的低磁阻磁路,位于工作绕组与控制绕组之间;各控制绕组单元采用相互串联的方式并集成于同一铁芯。其绕组排布的特点是:根据控制绕组级数,设置多个工作绕组,且各工作绕组并联;每个工作绕组与其控制绕组绕制在同一个铁芯柱上并由铁饼隔离;所有的工作绕组与控制绕组相互交错排布。当控制绕组短路时,流过控制绕组的磁通向对应的铁饼转移,使磁通过铁饼、空气、右侧柱并与工作绕组交链形成闭合回路。绕组交错排布的方式使每个控制绕组单元中的磁通不受其他控制绕组磁通的影响,进而实现控制绕组间的解耦。绕组间铁饼的设置,提高了工作绕组与控制绕组间的短路阻抗。根据控制绕组容量的不同,铁饼材料也不同。

分裂式磁集成 CRT 同样能够满足 CRT 高阻抗与弱耦合的设计要求,与多导磁材料磁集成 CRT 相比,其工作原理与实现控制绕组容量分配的方式是一致的,因此,工艺制造要求高的问题对于分裂式磁集成 CRT 而言是不可避免的。此外,分裂式磁集成 CRT 的各控制绕组单元除铁饼材料外均相同,各单元结构参数由控制绕组容量最大的单元所决定,因此,对于容量较小的控制绕组单元,将会造成材料的浪费。

1.4 多基本独立单元磁集成 CRT

多基本独立单元磁集成 CRT 的结构示意图如图 4 所示。图中, BW_k 为第 k 个工作绕组; CW_k 为第

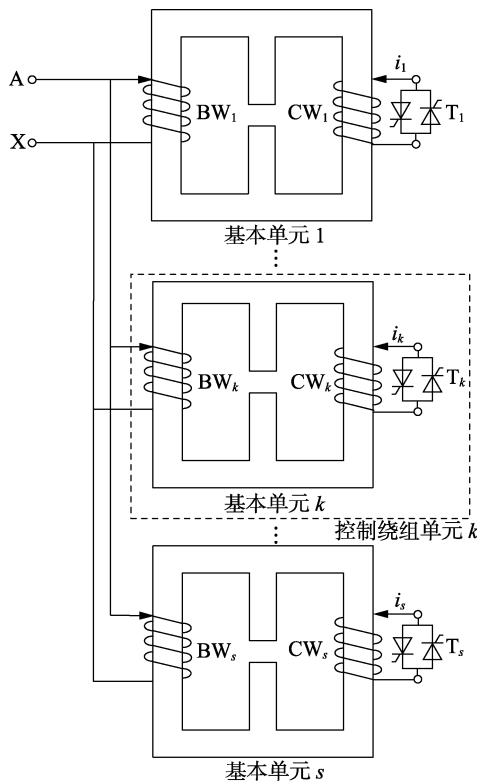


图 4 多基本独立单元磁集成 CRT 结构示意图

Fig.4 Structure of multi basic independent unit magnetic integrated CRT

k 个控制绕组。若将一个独立铁芯称为一个基本单元,那么对于具有 s 级控制绕组的多基本独立单元磁集成 CRT,则具有 s 个基本单元^[16]。由图 4 可知,多基本独立单元磁集成 CRT 的铁芯结构特点是:在工作绕组与控制绕组之间设置气隙柱作为低磁阻磁路,由工作绕组、控制绕组以及气隙柱构成控制绕组单元;每个控制绕组单元即为一个基本单元,且各控制绕组单元完全独立。其绕组排布特点是:工作绕组与控制绕组一一对应,且分别绕制在各基本单元的左侧柱和右侧柱上;各控制绕组单元的工作绕组相互并联。多基本独立单元磁集成 CRT 通过在每个基本单元设置气隙柱来提高短路阻抗,通过对各气隙柱气隙大小的改变而实现各控制绕组容量的灵活分配。除此之外,该结构的各控制绕组单元在结构上完全独立,则不存在控制绕组间的磁耦合问题。

多基本独立单元磁集成 CRT 结构简单、易于制造。与多导磁材料磁集成 CRT 与分裂式磁集成 CRT 相比,其在满足高阻抗与弱耦合的设计要求下对 CRT 的本体结构进行了简化,解决了现有磁集成 CRT 结构复杂、工艺要求高的问题,是一种较为理想的本体结构。但是, CRT 具有多控制绕组的特点,若控制绕组级数为 s ,多基本独立单元磁集成 CRT 则需要 s 个基本单元。这将增大 CRT 的重量与体积,且随着控制绕组级数的增加,该问题更加突出。若能在保证 CRT 控制绕组级数满足要求的前提下,有效地减少基本单元的个数,则可解决上述问题。

2 多控制绕组基本单元磁集成 CRT 结构的设计原则

磁集成 CRT 可根据其铁芯基本单元中所集成的控制绕组单元的数量,分为多控制绕组基本单元结构与单控制绕组基本单元结构这两大类。其中,多控制绕组基本单元是指将 CRT 的多个控制绕组单元集成于同一个铁芯基本单元中,且各控制绕组之间实现解耦,以减少基本单元个数。图 2 所示的多导磁材料磁集成 CRT 和图 3 所示的分裂式磁集成 CRT 具有多个控制绕组单元,且所有的控制绕组单元集成于一个铁芯中,因此,这 2 种结构均属于多控制绕组基本单元的范畴;图 4 所示的多基本独立单元磁集成 CRT,其每个铁芯单元中仅有 1 个控制绕组单元,因此该结构是单控制绕组基本单元。对于 CRT 而言,考虑铁芯制造工艺的复杂程度,在满足各控制绕组间实现解耦的条件下, CRT 的铁芯基本单元数量应尽可能地少。

假设 CRT 控制绕组级数为 s ,每个基本单元中控制绕组个数为 m ($2 \leq m \leq s$),则多控制绕组基本单元的个数 N (向上取整)为:

$$N = \left\lceil \frac{s}{m} \right\rceil \quad (1)$$

相较于单控制绕组基本单元,多控制绕组基本单元磁集成 CRT 减少的基本单元个数 Δn (向下取整)为:

$$\Delta n = \left\lfloor \frac{(m-1)s}{m} \right\rfloor \quad (2)$$

由式(2)可知, m 越大,则 Δn 越大,即每个铁芯基本单元中的控制绕组数量越多,所减少的铁芯基本单元数量就越多,因此,磁集成 CRT 若采用多控制绕组基本单元的方式,能够有效地减少多基本独立单元磁集成 CRT 的基本单元数量。

与多绕组变压器相比, CRT 最大的不同在于其正常工作状态为短路状态。为了使 CRT 控制绕组短路电流维持在额定值,其短路阻抗需达到 100%。通过对控制绕组所在铁芯并联低磁阻芯柱能够有效地提高 CRT 本体的短路阻抗。作为可控电抗器,其基本特点是实现空载到满载的过渡,而低磁阻磁路的独立则保证了 CRT 的短路阻抗随不同控制绕组的投入而发生变化,从而实现对 CRT 补偿容量的控制。

CRT 通常是根据控制绕组个数来确定工作绕组个数 b [12,14-15]。对于多控制绕组基本单元,当 $b=1$ 时,该工作绕组对应该基本单元中所有控制绕组。磁通沿着磁阻较小的磁路通过,由于 CRT 在空载时,铁芯主磁通与工作绕组和所有控制绕组交链但不通过低磁阻磁路,在额定负载时流经控制绕组所在芯柱的磁通向其对应的低磁阻芯柱“转移”。若将每个工作绕组产生的磁通与该工作绕组对应的控制绕组交链所形成的闭合回路(不与其他工作绕组对应的控制绕组交链)称为该工作绕组的独立闭合回路,那么对于每个多控制绕组基本单元而言,无论各控制绕组开路还是短路,铁芯中的各工作绕组的独立闭合路径个数则应是不变的。

综上,基于磁集成技术,结合目前不同结构磁集

成 CRT 的特点,在满足 CRT“高阻抗、弱耦合”的基本设计原则、从空载到满载容量可控的设计要求以及以结构简单为设计目标的条件下,多控制绕组基本单元磁集成 CRT 的结构设计原则有 2 点:①每个控制绕组都必须有一条独立的与其并联的低磁阻磁路;②忽略各绕组线阻,控制绕组无论处于开路状态还是短路状态,铁芯中各工作绕组的独立闭合回路数量不变。针对原则②,可通过对各绕组进行合理排布,或对各控制绕组的分级投入顺序进行合理设置使之得以满足。

3 双控制绕组基本单元磁集成 CRT 结构设计

在多控制绕组基本单元磁集成 CRT 结构设计原则的指导下,本文提出了双控制绕组基本单元磁集成 CRT,即每个基本单元中有 2 个控制绕组单元,且这 2 个控制绕组间实现解耦,其工作原理图如图 5 所示,其结构示意图如图 6 所示。

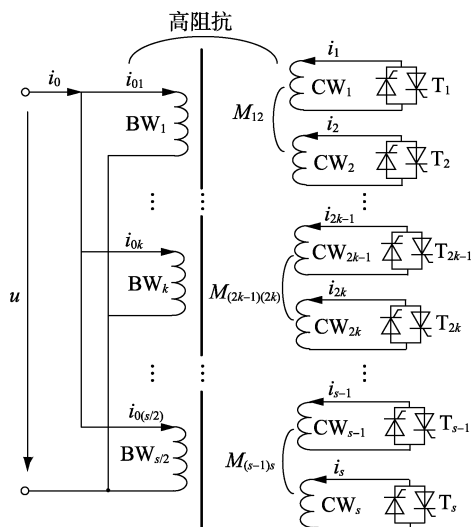


图 5 双控制绕组基本单元磁集成 CRT 工作原理图

Fig.5 Fundamental diagram of double control winding basic unit magnetic integrated CRT

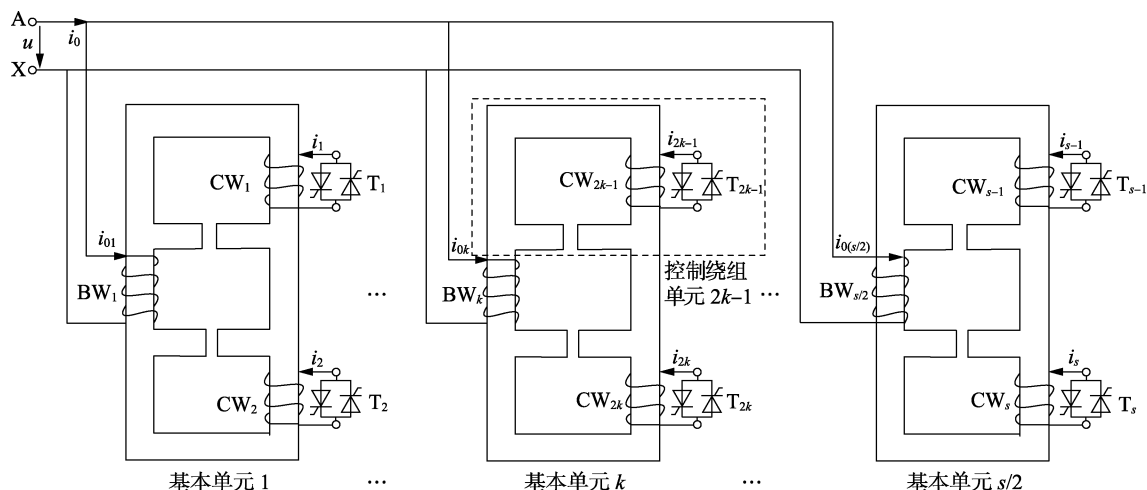


图 6 双控制绕组基本单元磁集成 CRT 结构示意图

Fig.6 Structure of double control winding basic unit magnetic integrated CRT

图 5 和图 6 中, $BW_k (k=1, 2, \dots)$ 为第 k 个基本单元的工作绕组, 各基本单元的工作绕组相互并联后直接与高压母线相连; u 为高压母线电压; i_0 为工作电流, 且 $i_0 = \sum_{k=1}^{s/2} i_{0k}$, 其中 i_{0k} 为各基本单元工作绕组电流; $CW_1, \dots, CW_s$ 为控制绕组; $T_1, T_2, \dots, T_s$ 为串联在控制绕组回路中的反并联晶闸管; $i_l (l=1, 2, \dots, s)$ 为第 l 级控制绕组的绕组电流; $M_{ij} (i \neq j)$ 为控制绕组 CW_i 与 CW_j 之间的互感, 且 $M_{ij} \approx 0$ 。工作绕组与控制绕组之间实现高短路阻抗。

在顺次单支路调节模式下, CRT 通过调节反并联晶闸管 $T_1, T_2, \dots, T_s$ 依次导通, 控制绕组 $CW_1, \dots, CW_s$ 依次短路, 使工作电流逐渐增大, 从而实现电抗器从空载到额定负载的过渡。

根据 CRT 的容量递增系数以及第一级控制绕组容量, 可计算 CRT 的控制绕组级数 $s^{[17]}$ 。当 s 为偶数时, CRT 的所有基本单元结构一致, 如图 6 所示; 当 s 为奇数时, CRT 的最后一个基本单元 (即第 $(s+1)/2$ 个基本单元) 为如图 4 所示的多基本独立单元磁集成 CRT 中的基本单元。

4 磁集成 CRT 对比分析

设工作绕组额定电压为 220 V, 额定电流为 40 A, 工作频率为 50 Hz, 控制绕组级数为 4 级, 每级额定电流分别为 5 A、5 A、10 A、20 A。工作绕组与控制绕组匝比为 1:1。铁芯采用正方形截面, 其材料为硅钢片, 单价 10.3 元/kg; 绕组材料为铜, 单价为 40 元/kg。根据电抗器设计原理对多导磁材料磁集成

CRT、分裂式磁集成 CRT、多基本独立单元磁集成 CRT 以及双控制绕组基本单元磁集成 CRT 进行结构参数计算, 其部分重要结构参数如表 1 所示 (由于阵列式磁集成 CRT 在功能上存在缺陷, 在算例分析中将不再对该结构进行分析计算)。

根据表 1 所示的结构参数以及算例要求, 可得到 4 种磁集成 CRT 的体积、重量、空载损耗及材料成本对比情况, 如表 2 所示。其中, 材料成本是指硅钢原材料与铜原材料的总成本。

表 3 为 4 种结构在结构复杂度、装配灵活度及运行维护便捷度方面的对比情况。

由表 2 和表 3 可以看出: 多导磁材料磁集成 CRT 和分裂式磁集成 CRT 虽能满足高阻抗、弱耦合的设计要求, 但其结构复杂, 在运行维护过程中的灵活性差, 且在体积、重量等方面并非最优, 实用性较弱; 多基本独立单元磁集成 CRT 虽然结构简单、维护方便, 但控制绕组单元完全独立的特点使铁芯及绕组材料使用过多, 造成其体积、重量、材料成本等的增加, 且随着控制绕组级数的增加, 该问题会更加严重, 因此, 该结构并不理想; 本文所提出的双控制绕组基本单元磁集成 CRT, 在现有磁集成 CRT 本体结构中体积最小、重量最轻、材料成本最低, 且结构简单、运行维护和装配灵活度高, 具有较为明显的优越性。

综上, 双控制绕组基本单元磁集成 CRT 有效地弥补了目前磁集成 CRT 的结构复杂、材料浪费等不足, 是较为理想的 CRT 本体结构, 具有良好的实用价值。

表 1 4 种磁集成 CRT 部分结构参数

Table 1 Partial structure parameters for four magnetic integrated CRTs

参数	多导磁材料式结构	多基本独立单元结构				分裂式结构	双控制绕组基本单元结构	
		基本单元 1	基本单元 2	基本单元 3	基本单元 4		基本单元 1	基本单元 2
铁芯边长/mm	67	50	50	59	70	54	53	70
工作绕组匝数/匝	154	276	276	198	141	[237 237 237 237]	246	141
控制绕组匝数/匝	[155 155 155 155]	276	276	198	141	[237 237 237 237]	[246 246]	[141 141]
工作绕组厚度/mm	18.5	22.2	22.2	22.2	22.2	[22.2 22.2 22.2 22.2]	22.2	20.6
控制绕组厚度/mm	[26.6 26.6 26.6 31.0]	22.2	22.2	22.2	22.2	[22.2 22.2 22.2 22.2]	[22.2 22.2]	[17.7 17.7]
工作绕组高度/mm	71.7	54.3	54.3	38.8	29.1	[46.5 46.5 46.5 46.5]	48.5	40.9
控制绕组高度/mm	[25.2 25.2 25.2 29.5]	54.3	54.3	38.8	29.1	[46.5 46.5 46.5 46.5]	[48.5 48.5]	[34.9 34.9]

表 2 4 种磁集成 CRT 在体积、重量等方面的对比情况

Table 2 Comparison of four magnetic integrated CRTs in volume, weight and so on

参数	多导磁材料式	分裂式	多基本独立单元式	双控制绕组基本单元式
体积/ m^3	0.042 1	0.041 2	0.046 1	0.039 5
重量/kg	79.321 1	86.142 5	93.099 7	75.811 1
材料成本/元	1 125.9	1 384.6	1 433.5	1 118.9
空载损耗/W	61.408 8	61.832 4	68.715 2	57.404 5

表 3 4 种磁集成 CRT 在结构、装配等方面的对比情况

Table 3 Comparison of four magnetic integrated CRTs in structure, assembly and so on

参数	多导磁材料式	分裂式	多基本独立单元式	双控制绕组基本单元式
结构复杂度	高	高	低	低
装配灵活度	低	低	高	高
运行维护便捷度	低	低	高	高

5 结论

阵列式结构、多导磁材料结构、分裂式结构、多

基本独立单元结构是目前磁集成 CRT 的主要结构。本文通过对这 4 种 CRT 的铁芯与绕组结构进行分

析,总结在满足 CRT 基本原则以及运行要求的条件下,多控制绕组基本单元磁集成 CRT 的结构设计原则;基于该原则,提出 CRT 的一种新型磁集成结构,即双控制绕组基本单元磁集成 CRT,并将该结构与现有磁集成 CRT 进行对比。研究得出如下结论。

a. 多控制绕组基本单元磁集成 CRT 的结构设计原则有 2 点:每个控制绕组都必须有一条独立的与其并联的低磁阻磁路;忽略绕组线阻,控制绕组无论是开路还是短路,铁芯中各工作绕组的独立闭合回路数量不变。

b. 双控制绕组基本单元磁集成 CRT 将磁集成技术应用于 CRT 的结构设计,在满足高阻抗与弱耦合的设计要求下,有效地减少了磁件的使用。

c. 通过对不同结构磁集成 CRT 在多方面的对比分析可知,双控制绕组基本单元磁集成 CRT 不仅结构简单、装配与维护灵活,且在体积、重量及材料成本等方面具有明显的优势,是目前较为理想的磁集成 CRT 本体结构,具有良好的实用价值。

参考文献:

- [1] 周浩,钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):6-12.
ZHOU Hao,ZHONG Yijun. Applicable occasions of UHVAC/UHVDC transmission and their technology comparisons in China[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(5):6-12.
- [2] 赫志远. 磁饱和可控电抗器的分析[D]. 济南:山东大学,2015.
HE Zhiyuan. Analysis of magnetic saturation controllable reactor[D]. Jinan:Shandong University,2015.
- [3] 田铭兴,柳铁彬,尹健宁,等. 变压器式可控电抗器绕组电流与触发角的关系[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):122-127.
TIAN Mingxing,LIU Yibin,YIN Jianning,et al. Relationship between CRT winding current and firing angle[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):122-127.
- [4] 田铭兴,石鹏太,马亚珍. n 级饱和磁阀式可控电抗器结构特性和仿真方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):95-101.
TIAN Mingxing,SHI Pengtai,MA Yazhen. Structural property and simulation method of n -stage saturable magnetic-valve controllable reactor[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):95-101.
- [5] 郭毅娜,田铭兴,原东升. 不同工作模式下基于谐波电流有效值分级标准的 CRT 参数设计[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):211-217.
GUO Yina,TIAN Mingxing,YUAN Dongsheng. Parameters design of CRT based on harmonic current effective value grading standard in different operation modes[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(9):211-217.
- [6] 顾生杰,田铭兴. 带谐波补偿绕组的变压器式可控电抗器的容性无功补偿性质分析[J]. 电工电能新技术,2014,33(6):41-46.
GU Shengjie,TIAN Mingxing. Analysis on capacitive reactive power compensation of controlled reactor of transformer type with harmonic-compensation winding[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2014,33(6):41-46.
- [7] 田铭兴,励庆孚. 变压器式可控电抗器的磁场和参数计算[J]. 西安交通大学学报,2005,39(6):656-658.
TIAN Mingxing,LI Qingfu. Calculation of magnetic flux and parameters of reactor of transformer type[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2005,39(6):656-658.
- [8] 龚岩. 变压器式可控电抗器损耗与温升研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.
GONG Yan. Research on the loss and temperature rise of a controllable reactor of transformer type[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2016.
- [9] 夏向阳,孔祥霖,帅智康,等. 基于磁集成结构 DC-DC 变换器的超级电容储能系统[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):95-99.
XIA Xiangyang,KONG Xiangji,SHUAI Zhikang,et al. Super-capacitor energy storage system based on DC-DC converter with integrated magnetic structure[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):95-99.
- [10] 成杰. 变结构控制在阵列式磁集成电压调整模块中的应用研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2008.
CHENG Jie. Applied research of the variable structural control in the magnetic array integrated voltage regulator modules[D]. Fuxin:Liaoning Technical University,2008.
- [11] LEE Y S,WONG L P,CHENG K W. Simulation and design of integrated magnetics for power converters[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2003,39(2):1008-1018.
- [12] 尹健宁. 变压器式可控电抗器磁集成结构设计理论研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
YIN Jianning. Theoretical study on design to magnetic integration structure of controllable reactor of transformer type[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2016.
- [13] 田铭兴,尹健宁,柳铁彬,等. 基于磁集成技术的变压器式可控电抗器的结构设计与分析[J]. 高电压技术,2014,40(10):3141-3149.
TIAN Mingxing,YIN Jianning,LIU Yibin,et al. Structure design and analysis of controllable reactor of transformer type based on magnetic integration technology[J]. High Voltage Engineering,2014,40(10):3141-3149.
- [14] YIN Jianning,TIAN Mingxing. Simulation analysis for controllable reactor of transformer type with multifold magnetic materials integration[J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems,2014,13:336-342.
- [15] 尹健宁,田铭兴,柳铁彬. 变压器式可控电抗器磁集成结构设计及仿真分析[J]. 电网技术,2014,38(11):3236-3241.
YIN Jianning,TIAN Mingxing,LIU Yibin. Design and simulation analysis on magnetic integrated structure of controllable reactor of transformer type[J]. Power System Technology,2014,38(11):3236-3241.
- [16] 田铭兴,付鹏宇,王田戈. 一种变压器式可控电抗器磁集成结构:ZL201620372484.7[P]. 2016-08-31.
- [17] 原东升. 变压器式可控电抗器绕组电流计算与参数优化[D]. 兰州:兰州交通大学,2014.
YUAN Dongsheng. Winding current calculation and parameter optimization of controllable reactor of transformer type[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2014.

作者简介:



田铭兴

田铭兴(1968—),男,甘肃武威人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统无功补偿和电压控制、电机电器设计分析及其电磁场数值计算(E-mail:tianmingxing@mail.lzjtu.cn);

(下转第 204 页 continued on page 204)

substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4):128-132.

- [16] 王果, 常文寰, Claus Leth Bak, 等. 基于无谐波检测和选择性谐波补偿原理的组合式同相供电系统控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12):130-137.

WANG Guo, CHANG Wenhuan, Claus Leth Bak, et al. Control strategy for combined co-phase power supply system based on theory of control without harmonic detection and selective harmonic compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):130-137.

作者简介:



唐宏伟

唐宏伟(1982—),男,湖南邵阳人,副教授,博士研究生,主要研究方向为电力电子与电能质量控制(E-mail: thwei2008@126.com);

唐杰(1975—),男,湖南邵阳人,教授,博士,主要研究方向为电能质量先进控制技术 & 装备(E-mail: 706648502@qq.com)。

Power quality management system of electrical railway based on YNVD balance transformer

TANG Hongwei^{1,2}, TANG Jie¹, LIN Li¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-Power Sources Area, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A power quality management system of electrical railway based on YNVD balance transformer is proposed. By using the delta connected secondary taps of YNVD balance transformer, together with the coupling transformer installed at the V-shape connected secondary side, an electric interface for a single-three phase back-to-back converter is provided. Compared with the traditional back-to-back converters, the proposed three-phase converter has more complex topology than single-phase one, while it only needs one coupling transformer, so that the disadvantages of the proposed system can be faded. Meanwhile, in order to keep the system compensation capacity, the three-phase converter can not only degenerate into single-phase converter on the malfunction of the c-phase bridge arm but also operate independently with the malfunction of single-phase inverter, which ensures the high reliability of the proposed system. Based on the theoretical analysis, a simulation model is built with MATLAB, and a small-capacity prototype is established. Both the simulative and experimental results verify the effectiveness of the proposed system.

Key words: balance transformer; electrical railway; power quality; system compensation capacity

(上接第196页 continued from page 196)

王田戈(1993—),女,陕西渭南人,硕士研究生,主要研究方向为变压器式可控电抗器的磁集成结构设计与电磁场数值计算(E-mail: tiange6093@163.com);

马长立(1993—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研

究方向为电力电子技术研究、集成电路设计与研发(E-mail: edgarma@126.com);

张子麒(1993—),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术 & 新能源应用(E-mail: 1034742109@qq.com)。

Comparative analysis and design of CRT with magnetic integrated structures

TIAN Mingxing^{1,2}, WANG Tiange^{1,2}, MA Changli^{1,2}, ZHANG Ziqi^{1,2}

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: By comparatively analyzing the structure characteristics of magnetic integrated CRT (Controllable Reactor of Transformer type), such as the array structure, multi magnetic material structure, split structure and multi basic independent unit structure, a structure design principle for a multi control winding basic unit magnetic integrated CRT is proposed. Based on this structure design principle, a novel magnetic integrated CRT named double control winding basic unit magnetic integrated CRT is proposed. Meanwhile, compared with the existing magnetic integrated CRT in aspect of volume, weight and structural complexity, the advantages of this novel magnetic integrated CRT is illustrated. The results show that the double control winding basic unit magnetic integrated CRT can meet the design requirements of "high impedance" and "weak coupling", moreover, it has obvious advantages such as small volume, light weight and simple structure.

Key words: controllable reactor of transformer type; magnetic integrated structure; design principle; comparative analysis