

基于电力电子变压器的新型贯通式同相供电变流器

李子欣^{1,2}, 张航^{1,2}, 雷鸣^{1,2}, 王哲^{1,2}, 王平¹, 李耀华^{1,2}

(1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文在对同相供电系统分类研究的基础上提出了一种基于单相-单相电力电子变压器(PET)的新型贯通式同相供电变流器电路拓扑。相对于传统的基于工频变压器的同相供电变流器方案,该拓扑可以取消工频变压器,并大幅减少低频滤波电感数量;相对于模块化多电平变流器(MMC)的方案,所提出的拓扑所需储能电容和低频滤波电感数量均可减少60%以上,而功率半导体数量几乎不变,可显著提升系统功率密度,降低系统造价。此外,当单台PET故障时系统可继续降额运行,而非系统全部停运,可靠性高。本文分析了所提出拓扑的工作原理并设计了控制策略。在所搭建的基于单相-单相PET的20MV·A贯通式牵引同相供电变流器模型上的仿真结果验证了该拓扑的正确性和有效性。

关键词: 电气化铁路; 牵引供电; 贯通式同相供电; 电力电子变压器; 电能质量

DOI: 10.12067/ATEEE1712020 **文章编号:** 1003-3076(2018)05-0001-11 **中图分类号:** U223.5

1 引言

在依靠公用电网提供电源的电气化铁路牵引供电系统中,由于铁路系统的单相供电制式与公用电网的三相制式不能直接匹配,使得铁路供电系统不得不在不同的供电分段采用分相供电,即不同的分段采用三相电网中的某一相进行供电。电分相的存在造成机车经过分相间的绝缘区时失去电能供应,也产生了牵引力和速度损失,并导致三相供电网中出现负序电流,且负序电流随着机车功率的增加变得越来越严重^[1-6]。解决牵引供电系统负序电流的传统方案一般是采用 Scott 等平衡变压器,此类方法有赖于平衡变压器输出侧两相负载的一致性,因此只能一定程度抑制负序,而并不能完全消除负序。

为了解决上述问题,有专家和学者提出了同相供电系统,即取消现有系统中的电分相,使机车在运行过程中获得的电压幅值和相位保持连续而不会发生突变。但是,目前我国电力系统一般按照高压环网、低压分区的方式运行和管理,不同的牵引供电分区所处的两侧虽为同相电压,但正常运行时一般不

能直接连通。另外,如果将不同供电分区的同一相通过牵引供电网直接连通并为机车供电,则只能选择三相电网中的一相,也会产生很大的负序电流。在这一背景下,依靠电力电子技术实现的同相供电技术获得了广泛的关注和研究。

现有的基于电力电子技术的同相供电系统方案一般可以分为有源补偿式和贯通式两种。

1.1 有源补偿式同相供电系统

有源补偿式同相供电系统是在工频牵引变压器供电的基础上增加基于电力电子技术的有源补偿装置,以便补偿三相电网中的负序电流和无功功率,一般可以分为单相补偿式和三相补偿式两种类型,其原理示意图如图1所示。

单相有源补偿式同相供电系统一般采用单相-单相 AC/AC 变流器对两个单相交流的有功和无功进行调节和控制,实际系统中一般采用间接式 AC/AC 变流器,即 AC/DC/AC 型的单相背靠背变流器^[7-11]。三相有源补偿式同相供电系统一般采用一台三相 AC/DC 变流器,即三相无功补偿器对牵引变压器输出绕组产生的无功功率进行统一补偿。三

收稿日期: 2017-12-12
作者简介: 李子欣(1981-),男,河北籍,研究员,博导,博士,主要研究方向为电力电子变压器、电能路由器、多电平及直流输电变流器等;
张航(1991-),男,河北籍,博士研究生,主要研究方向为大功率电力电子技术。

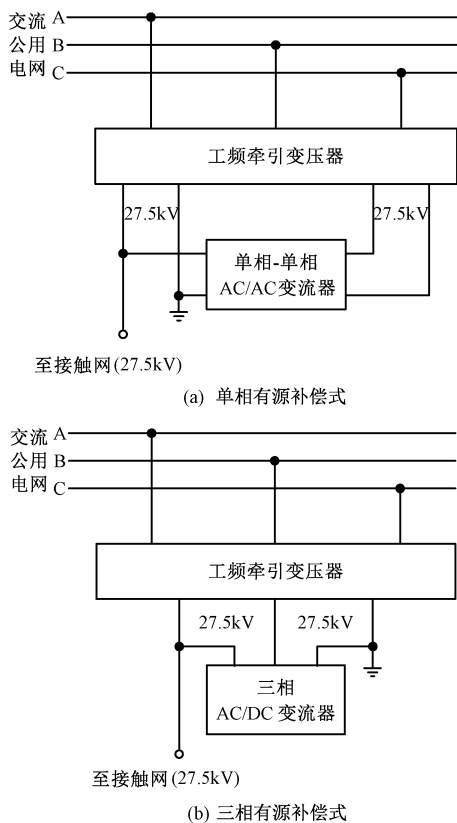


图1 有源补偿式同相供电方案示意图(单牵引所)

Fig.1 Schematic diagram of active compensation type co-phase power supply system in one substation

相AC/DC变流器一般采用两电平拓扑^[12,13]。

无论是单相还是三相有源补偿式同相供电系统,其有源补偿变流器交流侧的电压等级一般较高,例如在我国的典型值为27.5kV。为了降低有源补偿装置中功率半导体的电压应力,大多数情况下都需要在变流器的交流侧设置工频升压或降压变压器。但是,由于此类工频变压器工作电压高,运行频率低,体积和重量均较大,导致同相供电装置的功率密度难以提高,使得系统占地大、造价高。近年来,无需工频变压器的模块化多电平变流器(Modular Multilevel Converter, MMC)在有源补偿式同相供电系统中的应用也获得了关注^[14,15]。虽然MMC可以取消交流侧的工频变压器,但是由于其功率模块(或称为子模块)中的储能电容存在与交流电压同频的基频波动,导致其体积和重量较大^[16,17]。在27.5kV的中压场合应用时,其功率密度仍然难以提高。

由于有源补偿式同相供电系统具有同相供电能力,可以取消原有牵引供电所内的电分相装置,大大减少了供电系统的电分相数目。但是,由于每个牵

引供电所的输出电压主要决定于牵引变压器的某个输出绕组,相邻牵引变电所的输出电压相位一般不能保证完全相同,而是有显著差异,这就降低了同相牵引供电系统的供电质量和可靠性。更重要的是,此类系统无法取消牵引变电所之间的电分相装置,过电分相问题仍然存在。

1.2 贯通式同相供电系统

贯通式同相供电是指不同牵引变电所供电的各个分段电压相位几乎完全相同,接触网线路上无电分相的牵引供电方式。现有的贯通式同相供电系统方案示意图如图2所示,即一般由连接高压交流公用电网的工频牵引变压器和三相-单相AC/AC变流器组成。在实际系统中,三相-单相AC/AC变流器一般采用间接式AC/AC变流器,即AC/DC/AC型三相-单相背靠背变流器^[18,19]。贯通式同相供电系统的牵引变电所各个供电臂电压相同,可以取消电分相,消除了高速列车过分相绝缘区存在的电气隐患,也使列车能够获得连续的电力供应,解决了列车过分相和分段产生的牵引力和速度损失问题,更加适合高速铁路安全高效运行。同时,由于牵引变电所采用AC/DC/AC型三相-单相背靠背变流器,实现了牵引网和公用电网的解耦运行——公用电网与牵引网只交换有功功率,公用电网三相负荷平衡,无负序问题。而当公用电网或牵引网发生故障时,AC/DC/AC型三相-单相背靠背变流器实现双向的故障隔离,两个系统互不影响,安全性更高。

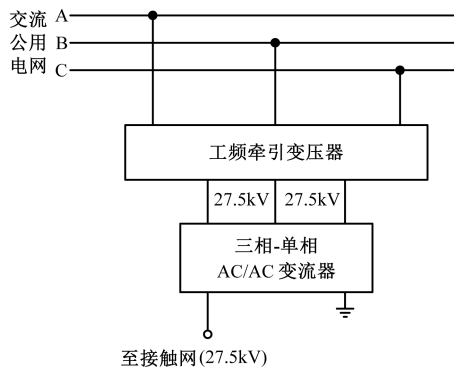


图2 现有贯通式同相供电方案示意图(单牵引所)

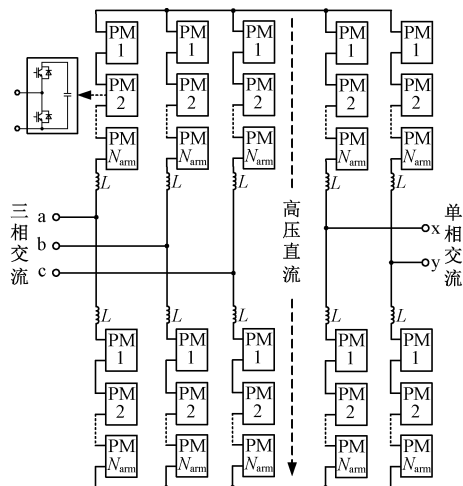
Fig.2 Schematic diagram of existing solution for continuous co-phase power supply system in one substation

由于交流电压等级较高,贯通式同相供电系统中的三相-单相背靠背变流器一般采用三电平^[20-22]、五电平^[23]等多电平拓扑。但是,三电平或者五电平的变流器受制于系统效率和开关频率限制,一般单台变流器的交流电压、电流谐波含量较大;另外,

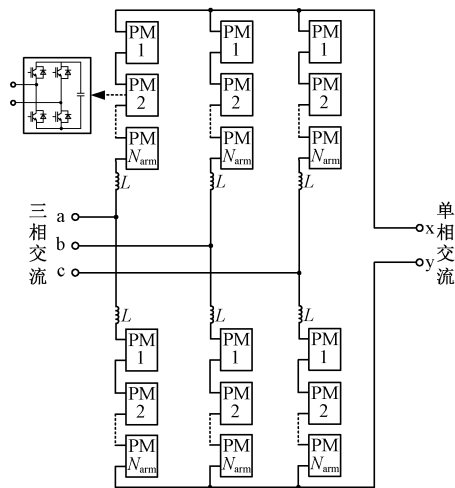
27.5kV 等级的交流电压仍然较高,目前的电力电子半导体器件水平下三电平或者五电平的变流器也难以直接承受。因此,在此类变流器的交流输入侧和输出侧均需设置特殊结构或特殊绕组的工频变压器消除交流电压、电流中的谐波,并降低变流器中功率半导体的电压应力。但是,如前所述,大量工频变压器的使用降低了此类贯通式同相供电变流器的功率密度和经济性。此外,由于变流器中功率半导体开关频率较低,而工频变压器和滤波电感数量多,导致系统运行噪声大。

为取消工频变压器并提高电能质量,有文献提出将 MMC 应用于贯通式同相供电系统,主要包括三相-单相 AC/DC/AC 型(或称间接 AC/AC 型) MMC^[22] 和三相-单相直接 AC/AC 型 MMC^[22,24],两种 MMC 的电路原理图如图 3 所示。图 3(a)所示的三相-单相间接 AC/AC 型 MMC 具有数十甚至更高电平的交流输出、谐波含量低、输入与输出交流侧功率解耦、运行效率高等突出优势,但是所需功率半导体和储能电容数量多,系统造价高。而相对于间接型,图 3(b)所示的三相-单相直接 AC/AC 型 MMC 除去具有谐波含量低、运行效率高等优点外,还可以大幅减少功率半导体和电容数量,具有更好的经济性。Siemens、ABB 等公司对应用于贯通式同相供电系统的三相-单相直接 AC/AC 型 MMC 开展了研究,而 Siemens 公司更是实现了其在 50Hz 公共电网和 16.7Hz 牵引网贯通式同相供电的工程应用。但是,三相-单相直接 AC/AC 型 MMC 属于矩阵式 MMC(matrix MMC)的一种,其交流输入与输出侧运行频率相同时一般需注入大量无功环流,否则系统无法稳定^[25,26],这影响了同频运行时的安全性和系统效率。而我国的电气铁路系统中,公用电网与牵引网的频率均为 50Hz,即对于同相供电变流器来说交流输入与输出频率相同,因此三相-单相直接 AC/AC 型 MMC 不适用于我国的电气化铁路贯通式同相供电系统。

近年来,基于高频变压器和多电平变流器的电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)或称为固态变压器(Solid-State Transfer, SST)在智能电网和机车牵引领域获得了广泛的关注和研究^[27-31]。在机车牵引领域 PET 主要用于替代车上的工频牵引变压器+单相整流器^[30,31],以减小车上牵引供电设备的体积和重量,提高车载牵引系统电气性能。为了解决现有贯通式同相供电系统方案存在的上述



(a) 三相-单相 AC/DC/AC 型 (间接 AC/AC 型) MMC



(b) 三相-单相直接 AC/AC 型 MMC

图 3 适用于贯通式同相供电系统的 MMC

Fig. 3 MMC topology suitable for continuous co-phase power supply system

问题,本文将 PET 应用到电气化铁路的地面牵引供电系统,提出了基于单相-单相 PET 的新型贯通式同相供电系统方案。分析了这一方案的工作原理和系统特性,设计了系统控制策略,并通过计算机仿真验证了这一方案的正确性。

2 基于 PET 的新型贯通式同相供电系统

2.1 系统拓扑及工作原理

本文提出的基于单相-单相 PET 的新型贯通式同相供电系统电路拓扑如图 4 所示。其中,牵引变压器为 Scott 型平衡变压器,其两个副边绕组(27.5kV 绕组)分别连接两台单相-单相 PET 的输入。正常运行时,两台单相-单相 PET 的输出侧并联在一起(K1、K2 均闭合)共同为接触网提供电源,每

台单相-单相 PET 只需提供牵引所供电容量的一半。当工频牵引变压器为平衡变压器,例如 Scott 变压器时,由于每台单相-单相 PET 输入功率相等且将功率因数控制为 1,牵引变压器高压输入侧三相电流对称且没有无功电流。

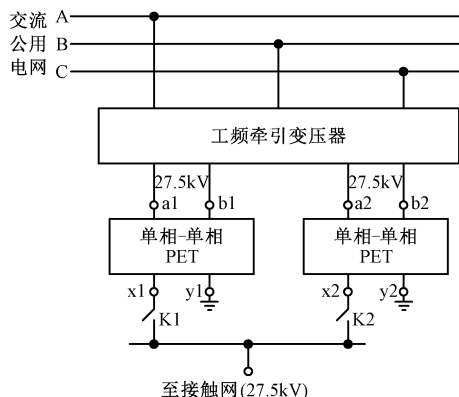


图 4 本文提出的 PET 型贯通式同相供电方案(单牵引所)

Fig. 4 Schematic diagram of proposed continuous co-phase power supply system based on PET in one substation

图 4 中的单相-单相 PET 电路拓扑如图 5 所示,即由输入侧的级联 H 桥、中间的高频隔离型 DC-DC 变换器和输出侧的级联 H 桥组成。输入侧的级联 H 桥实现电能由交流到直流的变换(牵引时,制动时反之),输出侧的级联 H 桥实现电能由直流到交流的变换(牵引时,制动时反之)。中间的高频隔离型 DC-DC 变换器主要实现高频变压器原副边电路的电气隔离,变压比一般为 1:1;而变压器原副边的高频谐振电容 C_{r1} 和 C_{r2} 与变压器漏感构成的串联谐振电路谐振频率与变压器两侧的半桥变流器开关频率相同,且以 50% 占空比进行开环控制,可以实现原副边所有 IGBT 的零电流(Zero Current Switching, ZCS)软开关,大幅降低 PET 系统的损耗。

2.2 所提出方案的特点

对比已有的贯通式同相供电系统技术方案,本文提出的基于单相-单相 PET 的方案具有如下特点。

(1) 无源储能元件需求低,功率密度高

无需工频变压器,每台单相-单相 PET 只需要两台工频滤波电抗器,且不含有直流分量;而工频变压器的方案一般需要多台滤波电感或者很大的变压器漏感;MMC 拓扑则需要多台含有直流分量和工频分量的桥臂电抗器。同时,单相-单相 PET 中功率模块的电容电压最低频波动为电网电压的 2 倍频波动,而非 MMC 中的基波波动,功率模块所需电容更小,因此具有更高的功率密度。

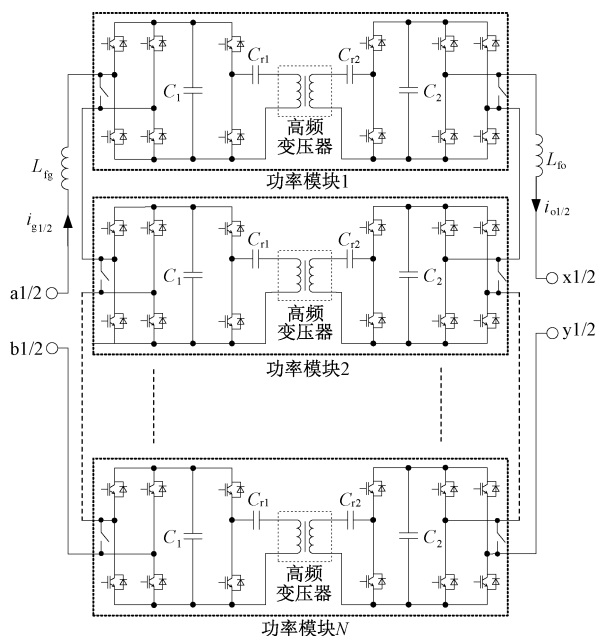


图 5 用于本文提出贯通式同相供电系统的单相-单相 PET

Fig. 5 Proposed single-phase to single-phase PET for continuous co-phase power supply system

(2) 电能质量高,运行噪声小

由于本文提出的单相-单相 PET 输入侧与输出侧均为级联 H 桥型多电平变流器,因此可以通过载波相移技术在很低的开关频率下产生数十电平的交流电压,实现极低谐波含量的电压、电流控制,即能够实现高效率下的高电能质量。另外,变压器和滤波电感是变流器中产生噪声的主要元件。本文提出的 PET 大幅减少了滤波电感数量,且通过多电平技术大幅降低滤波电感中的谐波含量,而高频变压器工作频率很高,系统可实现低噪声运行。

(3) 输入与输出实现了高频化电气隔离

通过高频变压器实现了输入与输出侧的电气隔离功能,相对于 MMC 方案具有更好的系统安全性;而相对于工频变压器,例如多绕组变压器或多台变压器的方案大幅减少了感性元件的数量和体积。

(4) 变流器运行可靠性高

本文提出的单相-单相 PET 中输入侧与输出侧均为 H 桥功率模块级联结构,只需要在每个 H 桥功率模块的交流侧并联机械开关即可非常容易地实现功率模块的冗余设计及故障旁路——这一技术在柔性高压直流输电领域获得广泛应用,十分成熟。只需设置一定数量的备用功率模块,则可以实现 PET 主电路的高可靠性运行。

(5)供电系统可靠性高

每个牵引所包括两台单相-单相 PET,正常情况下,两台 PET 输入侧分别连接牵引变压器的副边两个 27.5kV 绕组,输出侧并联在一起为接触网供电。当一台 PET 出现故障无法运行时,则该 PET 退出运行(K1 或 K2 断开),而另外一台仍可正常运行,牵引所可降额输出而非停止向接触网供电;即便两台 PET 均出现故障,牵引所也可恢复到传统的异相供电方式,具有很高的系统运行可靠性。

2.3 与 MMC 方案的算例对比

相对于传统的工频输入、输出变压器 + 三电平/五电平变流器的方案,无需工频变压器的 MMC 在贯通式同相供电系统中具有很好的应用价值。但是,由于图 3 (b) 所示的三相-单相直接 AC/AC 型 MMC 不适用于我国公用电网与牵引网同为 50Hz 的情况,下面仅对比分析图 3 (a) 所示的三相-单相 AC/DC/AC 型(间接 AC/AC 型) MMC。另外,图 4 中的单相-单相 PET 也可以考虑采用单相背靠背 MMC,如图 6 所示。

为了便于对比讨论,下面将上述三种同相供电变流器的方案分别命名为方案 I、II 和 III:①方案 I:图 3(a)中的三相-单相 MMC;②方案 II:图 6 中的单相-单相 MMC;③方案 III:图 4/图 5 中的单相-单相 PET。

三种方案均按照如下条件进行:三相 MMC 的交流线电压和单相-单相 PET 的输入和输出电压有效值均为 27.5kV,功率半导体均采用 6500V 的 IGBT 器件,IGBT 的额定工作电压在 3600V 左右,空载调制比约为 0.9(三相 MMC 调制不注入零序电压

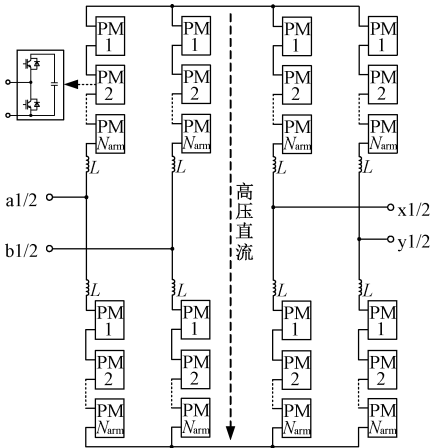


图 6 图 4 中单相-单相 PET 的替代方案:单相背靠背 MMC
Fig. 6 Alternative solution to single-phase to single-phase PET in Fig. 4: Single-phase BTB MMC

以降低电磁干扰)。MMC 的功率模块采用最常见的半桥拓扑,且都不考虑主电路冗余设置的情况下,三种方案所需的 IGBT 数量见表 1。

由表 1 的对比结果可见,基于单相-单相 PET 的方案 III 相对于基于 MMC 的方案 I 和方案 II 可以显著减少无源储能器件需求,储能电容数量比 MMC 方案 I 可减少约 64%,比 MMC 方案 II 可减少 75%;低频滤波电感数量比 MMC 方案 I 可减少 60%,比 MMC 方案 II 可减少 75%;而所需功率半导体的数量比 MMC 方案 I 仅增加约 9%,比 MMC 方案 II 减少 25%。由于电容、电感等无源储能元件工作频率低,其体积在变流器中占比非常高,而 IGBT 等功率半导体体积很小,因此,相对于基于 MMC 的方案 I 或方案 II,单相-单相 PET 方案可以显著提高同相供

表 1 三种贯通式同相供电变流器方案对比

Tab.1 Comparison of three circuit topologies for continuous co-phase power supply system			
	方案 I	方案 II	方案 III
一个牵引所需配置的变流器数量/台	1	2	2
一台变流器需要的功率模块数量/个	132 (输入侧三相 MMC 每桥臂 14 个模块,输出侧单相 MMC 每桥臂 12 个模块)	192 (单相 MMC 每桥臂 12 个功率模块,两台 MMC 共 192 个模块)	12 (每台 PET 由 12 级模块构成,每个模块含 2 个 H 桥和 1 个 DC-DC 变换器)
一个牵引所需要的储能电容数量/台	132 (额定电压 3.6kV)	192 (额定电压 3.6kV)	48 (额定电压 3.6kV)
一个牵引所需要的低频滤波电感数量/台	10 (含很大直流分量)	16 (含很大直流分量)	4 (无直流分量)
一个牵引所需要的高压 IGBT 数量/只	264 (6.5kV 器件)	384 (6.5kV 器件)	288 (6.5kV 器件)

电变流器的功率密度。

另外,考虑寿命、可靠性及通流能力等因素的限制,高压级联型的电力电子变流器功率模块中储能电容通常采用金属氧化物薄膜电容,而一般不采用电解电容。但是,金属氧化物薄膜电容的价格一般较高,其造价通常占到一个功率模块成本(实际工程应用的功率模块内一般含有储能电容、IGBT及驱动电路、高压储能电源、高压旁路开关、高压电压传感器、功率模块控制电路等)的40%甚至更高,也高于功率半导体的价格(一般一台储能电容的价格约为一只IGBT价格的2倍或更高)。

此外,上述三种方案中的低频滤波电感由于工作电压高、电流大其造价也远高于半导体的价格(一般一台27.5kV/20MV·A场合应用的滤波电感价格约为一只IGBT价格的50倍以上)。因此,相对于基于三相-单相MMC的方案I或者单相-单相MMC的方案II,基于单相-单相PET的同相供电变流器通过大幅减少储能电容和滤波电感数量,也可以显著降低系统造价。

3 系统控制策略设计

由图4可见,一个牵引所内的贯通式同相供电系统由两台单相-单相PET组成,其中的工频牵引变压器为Scott平衡变压器,两台PET的控制策略框图分别如图7和图8所示。

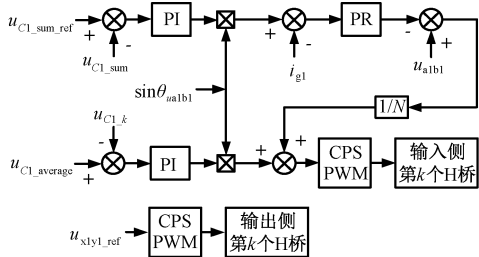


图7 第一台PET控制策略($k=1, 2, \dots, N$)

Fig. 7 Control strategy for first PET ($k=1, 2, \dots, N$)

第一台PET的输入侧级联H桥控制系统由功率模块储能电容 C_1 的电压之和,即 u_{C1_sum} 作为外环,闭环控制器为PI调节器;交流输入电流 i_{g1} 作为内环,且控制功率因数为1,闭环控制器采用PR调节器,谐振控制器R的谐振频率与电网电压频率相同。由于交流输入侧电流 i_{g1} 的幅值直接影响电容 C_1 的电压大小,因此电压外环的控制输出作为 i_{g1} 幅值给定值, i_{g1} 的相位与其交流输入电压 u_{a1b1} 相同。另外,由于稳态时输入侧级联的每个H桥交流电压

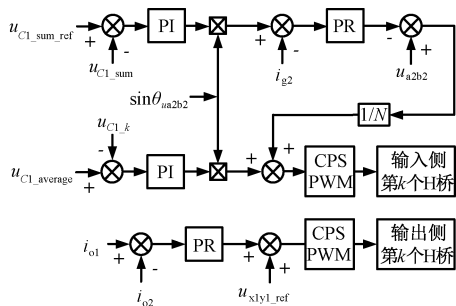


图8 第二台PET控制策略($k=1, 2, \dots, N$)

Fig. 8 Control strategy for second PET ($k=1, 2, \dots, N$)

(开关周期平均值与参考值相等)与流过的电流 i_{g1} 基本同相位,因此通过调整每个H桥的参考电压即可调整每个H桥中电容电压,也就可以实现对不同功率模块电容电压的均衡控制,即图5所示的输入侧每个H桥 C_1 电压与输入侧所有H桥 C_1 电压平均值进行比较后进行闭环控制并调节每个H桥参考电压。第一台PET的输出侧级联H桥采用输出电压开环控制模式,即 u_{xly1} 的参考电压为开环给定,例如有效值为27.5kV的50Hz正弦电压。

第二台PET的输入侧级联H桥控制系统与第一台PET相同,即由功率模块储能电容 C_1 的电压外环和交流输入电流 i_{g1} 内环组成,功率模块的均压方法与第一台的情况也相同。不同之处在于,第二台PET输出侧级联H桥采用电流跟踪控制模式,即 i_{o2} 的给定值为 i_{o1} ,输出电流跟踪闭环控制器采用PR调节器,以实现良好的稳态和动态性能。此种设计的主要目的是保证两台PET输入及输出功率相同,这样既能使两台PET采用完全相同的设计,也能使得正常运行时Scott牵引变压器高压侧的三相输入电流保持平衡,而无负序成分。

另外,两台PET输入侧与输出侧的级联H桥均采用载波相移脉宽调制(Carrier Phase Shifted Pulse Width Modulation, CPSPWM),以在很低的开关频率下实现高质量的电压、电流波形。此外,两台PET的中间隔离型DC-DC变换器高频变压器的漏感与高频谐振电容 C_{r1}/C_{r2} 形成LC串联谐振回路,变压器原副边半桥均输出占空比50%的方波电压,且相位相同,此电压的频率与LC谐振回路的谐振频率相同。此类DC-DC变换器在谐振频率下的阻抗非常小,即便采用开环控制也能实现输出侧 C_2 电压与输入侧 C_1 电压的良好跟踪,误差十分微小,且能自动实现功率的双向流动控制^[32]。因此,在本文中隔离型DC-DC变换器也采用开环控制。

4 仿真结果

为了验证本文提出的基于 PET 的贯通式同相供电系统的正确性,在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了 20 MV·A 贯通式牵引同相供电变流器仿真模型,仿真参数见表 2。

表 2 仿真参数

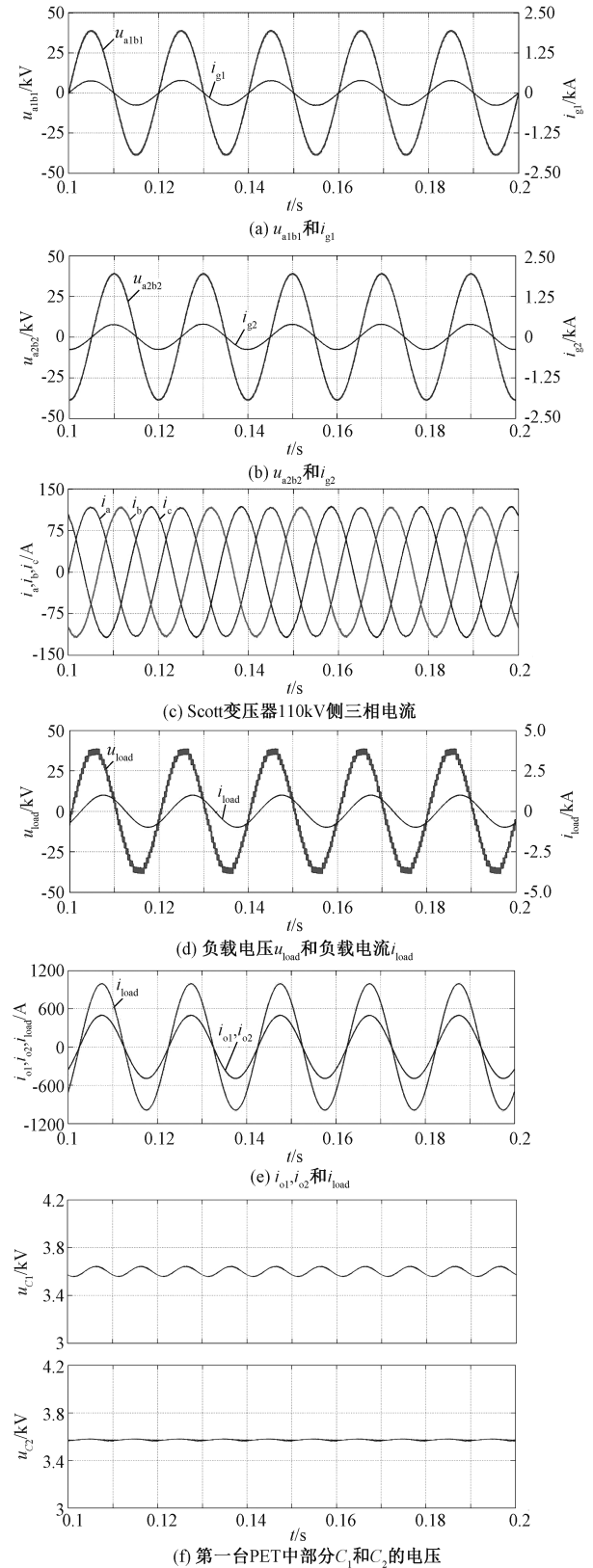
Tab.2 Simulation parameters

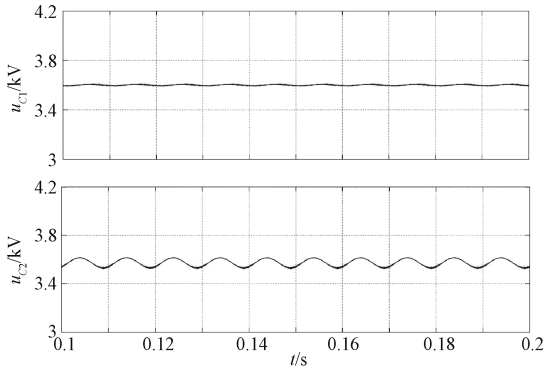
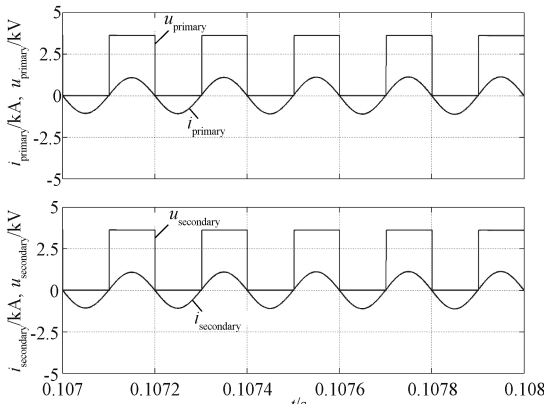
参数	数值
牵引变压器类型	Scott
牵引变压器原边(高压侧)电压	110kV/50Hz
牵引变压器副边(低压侧)电压	27.5kV/50Hz
系统供电容量/(MV·A)	20
单台 PET 容量/(MV·A)	10
PET 输入侧滤波电感 L_{fg} /mH	15(0.06pu)
PET 输出侧滤波电感 L_{fo} /mH	15(0.06pu)
一台 PET 中串联功率模块数量 N	12
储能电容 C_1/C_2 容值/mF	6
储能电容 C_1/C_2 额定电压/V	3600
高频变压器变压比	1:1
高频变压器工作频率/kHz	5
高频变压器原边/副边漏感/ μ H	22.8
高频谐振电容 C_{r1}/C_{r2} 容值/ μ F	88.9
输入/输出侧 H 桥调制方式	载波移相 PWM
输入/输出侧 H 桥 IGBT 开关频率/Hz	500
输出侧单相阻感串联负载	20MV·A, $PF=0.8$

该仿真中,两台单相-单相 PET 的控制策略如图 7 和图 8 所示,其中,两台 PET 的电容电压外环 PI 调节器的传递函数均为: $PI_{-u_{dc}}(s)=0.5+80/s$;输入侧电流内环 PR 调节器的传递函数为: $PR_{-i_g}(s)=120+85000s/(s^2+98696)$;第一台 PET 输出为电压开环控制, u_{x1y1} 的参考电压有效值为 27.5kV;第二台 PET 输出为电流跟踪控制,即 i_{o2} 的给定值为 i_{o1} ,PR 闭环控制器传递函数为: $PR_{-i_{o2}}(s)=50+20000s/(s^2+98696)$;两台 PET 的中间隔离型 DC-DC 变换器均采用开环控制,即变压器原副边的电压均为占空比为 50% 的方波电压,开关频率为 5kHz。本文所提出的新型贯通式同相供电系统稳态仿真结果如图 9 所示。

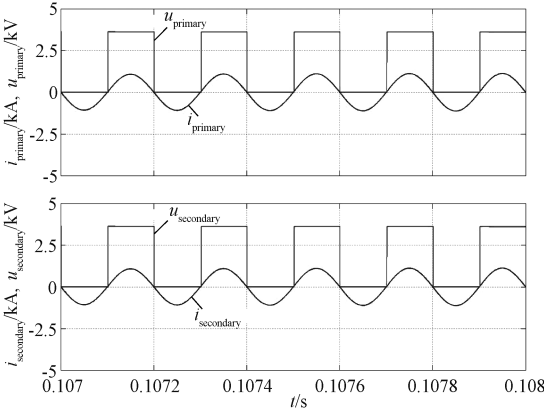
由图 9(a)~图 9(c)可见,系统稳态运行时,两台 PET 交流输入侧的电压与电流相位几乎完全相同,即功率因数为 1,不存在无功功率。而 Scott 变压器的 110kV 高压电网侧三相电流几乎完全对称,即不存在负序分量,且谐波含量很低,三相电流的总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion,THD)均小于

2%,电能质量较高。由图 9(d)和图 9(e)可见,负载侧交流电压谐波含量较低,电压 THD 小于 5%。同时,两台 PET 的输出电流几乎完全相同,即实现了均流(均功率)并联运行。



(g) 第二台PET中部分 C_1 和 C_2 的电压

(h) 第一台PET中高频变压器原副边电压和电流



(i) 第二台PET中高频变压器原副边电压和电流

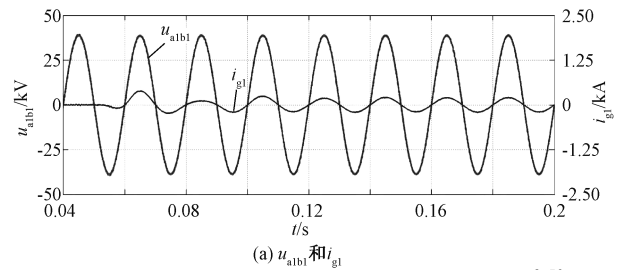
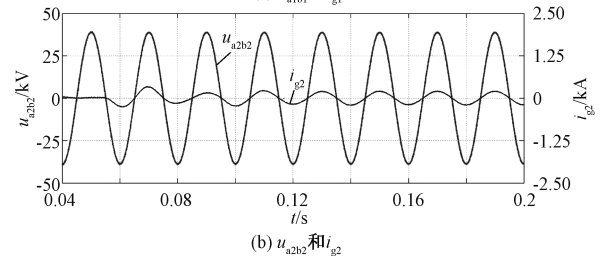
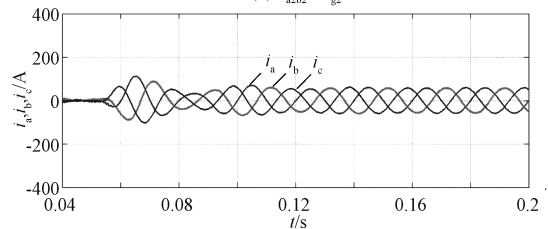
图9 20MV·A 负载下的稳态仿真结果

Fig.9 Steady-state simulation results under 20MV·A load

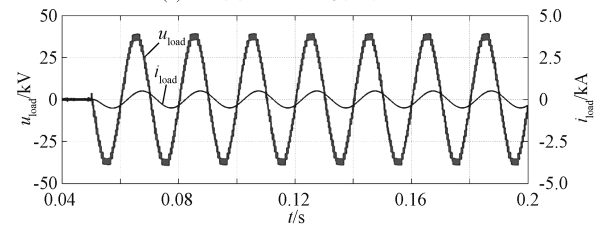
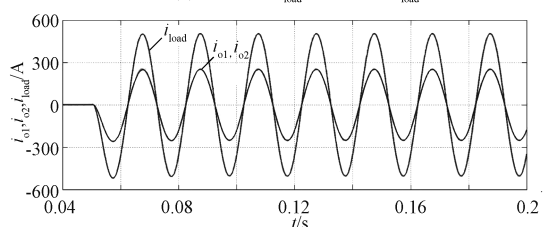
由图9(f)和图9(g)可见,两台PET中隔离型DC-DC变换器原副边的直流电容电压均稳定在额定值附近,但波动规律不同。这是因为,两台PET输入侧分别连接到了Scott变压器副边的不同绕组,而这两个绕组的电压相差 90° ,使得每台PET输入的瞬时功率不同,导致各台PET的电容电压波动规律不同。由图9(h)和图9(i)可见,两台PET中高频变压器原副边的H桥交流侧电压均在其输出电

流为零时发生跳变,即所有的IGBT均实现了ZCS软开关,可以显著降低中间隔离型DC-DC变换器的损耗,提高PET系统运行效率。

该同相供电变流器在0.05s时由空载突加10MV·A、 $PF=0.8$ 的阻感负载的仿真结果如图10所示。由图10可见,该同相供电系统在突加负载的情况下,两台PET输入侧及输出侧的电压、电流响应时间均小于40ms,动态响应迅速。同时,两台PET中的所有储能电容电压也保持稳定,动态调整过程中的控制误差小于2%。上述仿真结果也验证了本文提出的基于单相-单相PET的贯通式同相供电变流器的正确性和可行性。

(a) u_{a1b1} 和 i_{g1} (b) u_{a2b2} 和 i_{g2} 

(c) Scott变压器110kV侧三相电流

(d) 负载电压 u_{load} 和负载电流 i_{load} (e) i_{o1} 、 i_{o2} 和 i_{load}

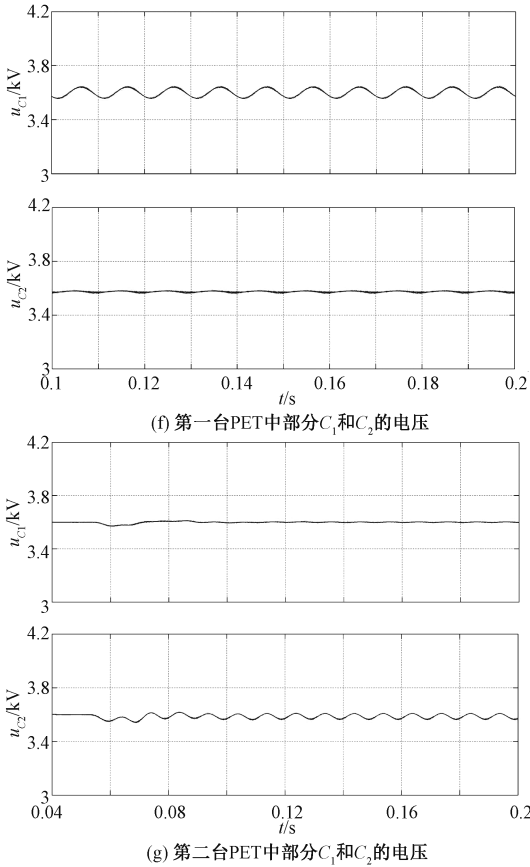


图 10 突加 10MV·A 负载下的动态仿真
Fig. 10 Dynamic-state simulation results under 10MV·A load change

5 结论

本文提出了一种基于单相-单相电力电子变压器的新型贯通式同相供电变流器电路拓扑。该拓扑可以取消传统方案中的工频变压器,且大大减少了感性储能元件的数量;相对于基于三相-单相或单相-单相 MMC 的方案,该拓扑所需储能电容的数量可以减少 60% 以上且电容电压中不含有基频波动,因此可以大幅提高同相供电变流器的功率密度,降低系统造价。在所搭建的基于单相-单相 PET 的 20MV·A 贯通式牵引同相供电变流器模型上的稳态和动态仿真结果表明,输入电流及输出电压谐波含量均较小,电能质量较高,从而验证了所提出拓扑的正确性。

此外,本文所研究的单相-单相 PET 型的同相供电变流器采用了多级电能变换环节。但是,由于其中的隔离型 DC-DC 变换器(直流 PET)采用了软开关技术,高频变压器原副边的 H 桥中所有的功率半

导体(IGBT)均实现了软开关低损耗运行,因此可以实现高频下的高效率运行。而随着碳化硅等高压、高频、低损耗宽禁带半导体的应用和推广,该方案的效率会进一步提高。

参考文献 (References):

[1] 李群湛 (Li Qunzhan). 牵引变电所供电分析及综合补偿技术 (Power supply analysis and comprehensive compensation technology for the traction substation) [M]. 北京: 中国铁道出版社 (Beijing: China Railway Publishing House), 2006. 1-4, 108-115.

[2] 李群湛, 贺建闽, 解绍锋 (Li Qunzhan, He Jianmin, Xie Shaofeng). 电气化铁路电能质量分析与控制 (Analysis and control of power quality of the electrified railway) [M]. 成都: 西南交通大学出版社 (Chengdu: Southwest Jiaotong University Press), 2011. 51-62.

[3] 李群湛 (Li Qunzhan). 论新一代牵引供电系统及其关键技术 (On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway) [J]. 西南交通大学学报 (Journal of Southwest Jiaotong University), 2014, 49 (4): 559-568.

[4] Gazafrudi S M M, Langerudy A T, Fuchs E F, et al. Power quality issues in railway electrification: A comprehensive perspective [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (5): 3081-3090.

[5] 李群湛, 张进思, 贺唯俊 (Li Qunzhan, Zhang Jinsi, He Weijun). 适用于重载电力牵引的新型供电系统的研究 (Study of a new power supply system for heavy haul electrical traction) [J]. 铁道学报 (Journal of the China Railway Society), 1988, 10 (4): 23-31.

[6] 李群湛, 贺建闽 (Li Qunzhan, He Jianmin). 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术 (Electrified railway feeding system without phase exchange and symmetrical compensation technology) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1996, 20 (4): 9-11, 28.

[7] Chen M, Li Q, Roberts C, et al. Modelling and performance analysis of advanced combined co-phase traction power supply system in electrified railway [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10 (4): 906-916.

[8] Dai N Y, Lao K W, Wong M C, et al. Hybrid power quality conditioner for co-phase power supply system in electrified railway [J]. IET Power Electronics, 2012, 5 (7): 1084-1094.

[9] Chen B, Zhang C, Tian C, et al. A hybrid electrical magnetic power quality compensation system with mini-

- mum active compensation capacity for V/V cophase railway power supply system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (6): 4159-4170.
- [10] Zhang D, Zhang Z, Wang W, et al. Negative sequence current optimizing control based on railway static power conditioner in V/v traction power supply system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (1): 200-212.
- [11] Shu Zeliang, Xie Shaofeng, Li Qunzhan. Single-phase back-to-back convertor for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in Traction Power System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (2): 334-343.
- [12] Sun Z, Jiang X, Zhu D, et al. A novel active power quality compensator topology for electrified railway [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (4): 1036-1042.
- [13] Hu S, Zhang Z, Chen Y, et al. A new integrated hybrid power quality control system for electrical railway [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (10): 6222-6232.
- [14] Ma F, Xu Q, He Z, et al. A railway traction power conditioner using modular multilevel converter and its control strategy for high-speed railway system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2 (1): 96-109.
- [15] 周阳, 李群湛 (Zhou Yang, Li Qunzhan). 基于 MMC 的同相供电有源补偿器 (Research on active power compensator for co-phase power supply system based on MMC) [J]. 铁道学报 (Journal of the China Railway Society), 2017, 39 (4): 25-31.
- [16] Ilves K, Antonopoulos A, Norrga S, et al. Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 27 (1): 57-68.
- [17] Song Q, Liu W, Li X, et al. A steady-state analysis method for a modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (8): 3702-3713.
- [18] 漆炜之, 刘全景, 谢永强, 等 (Qi Weizhi, Liu Qunjing, Xie Yongqiang, et al.). 基于三相-单相变换的新型同相供电系统方案 (A new cophase power supply system based on three-phase to single-phase convertor) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (4): 93-98.
- [19] He Xiaoqiong, Shu Zeliang, Peng Xu, et al. Advanced cophase traction power supply system based on three-phase to single-phase convertor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (10): 5323-5333.
- [20] 崖尚松 (Ya Shangsong). 一种用于贯通式同相供电系统的变换器拓扑结构研究 (A converter topology for advanced co-phase traction power supply system) [D]. 成都: 西南交通大学 (Chengdu: Southwest Jiaotong University), 2016.
- [21] Ranneberg J. Transformerless topologies for future stationary AC-railway power supply [A]. European Conference on Power Electronics and Applications [C]. 2008. 1-11.
- [22] Winkelnkemper M, Korn A, Steimer P. A modular direct converter for transformerless rail interties [A]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C]. 2010. 562-567.
- [23] 常非, 赵丽平, 冯金博 (Chang Fei, Zhao Liping, Feng Jinbo). 五电平交直交变换器在贯通同相供电中的应用 (Application of five-level AC/DC/AC converter on continuous co-phase power supply system) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2015, 27 (1): 26-31.
- [24] Gruber R, O'Brien D. Use of Modular Multilevel Converter (MMC) technology in rail electrification [A]. Australasian Railway Association Conference & Exhibition (AusRAIL) [C]. 2014. 1-8.
- [25] Kammerer F, Gommeringer M, Kolb J, et al. Energy balancing of the Modular Multilevel Matrix Converter based on a new transformed arm power analysis [A]. European Conference on Power Electronics and Applications [C]. 2014. 1-10.
- [26] Karwatzki D, Baruschka L, Mertens A. Survey on the Hexverter topology - A modular multilevel AC/AC converter [A]. The 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia [C]. 2015. 1075-1082.
- [27] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等 (Li Zixin, Wang Ping, Chu Zufang, et al.). 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究 (Research on medium- and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (9): 2592-2601.
- [28] She X, Huang A Q, Burgos R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1 (3): 186-198.
- [29] 王优, 郑泽东, 李永东 (Wang You, Zheng Zedong, Li Yongdong). 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述 (Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer)

- [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 1-10.
- [30] Gu C, Zheng Z, Xu L, et al. Modeling and control of a multiport power electronic transformer (PET) for electric traction applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31 (2): 915-927.
- [31] Feng J, Chu W Q, Zhang Z, et al. Power electronic transformer based railway traction systems: Challenges and opportunities [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5 (3): 1237-1253.
- [32] Esser A, Skudelny H C. A new approach to power supplies for robots [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 27 (5): 872-875.

New continuous co-phase traction power supply converter system based on power electronic transformer

LI Zi-xin^{1,2}, ZHANG Hang^{1,2}, LEI Ming^{1,2}, WANG Zhe^{1,2}, WANG Ping¹, LI Yao-hua^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, a novel continuous co-phase power supply converter system is proposed based on single-phase to single-phase power electronic transformer (PET). Compared with the traditional converter in the continuous co-phase traction power supply system that adopts the grid-frequency transformer, this topology greatly reduces the number of the low frequency inductors with no need of low-frequency transformer. With respect to the MMC type topology, the proposed system can reduce the quantity of the required storage capacitance and the low-frequency filter inductors by 60% with the same number of power semiconductor devices. Therefore, the proposed solution can significantly improve the power density and reduce the cost. In addition, the proposed system has high reliability and can continue to work even though one of the two PETs fails. The operation principle of the proposed converter is analyzed and the control strategy is also designed. The simulation results based on a 20MV·A continuous traction co-phase power supply converter model verify the correctness and effectiveness of the presented solution.

Key words: electrified railway; traction power supply; continuous co-phase power supply; power electronic transformer; power quality