

基于高压直流输电的新型电气化铁道供电方法

何伯钧, 邓 明, 谭胜武, 秦灿华, 王世平

(株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 针对传统牵引供电网存在的功率因数低、谐波含量高、网压不足、电能损耗大等能效问题, 提出了一种基于高压直流输电的新型电气化铁道供电方法。在对传统牵引网能效问题解决方法进行分析的基础上, 构建了基于高压直流输电的交流牵引供电网和直流牵引供电网两种系统拓扑。利用最近电平逼近技术对牵引网谐波含量进行了分析, 论述了功率控制解耦技术的动态调节原理, 研究了直流环节对牵引网的谐波含量和能量损耗的改善, 比较了两种新型牵引网系统拓扑的优势和实现的可能性。

关键词: 牵引供电网; 高压直流输电; 最近电平逼近调制; 功率解耦控制

中图分类号: U223.6

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)06-0021-04

A Novel Power Supplying Method for Electrified Railway Based on HVDC

HE Bo-jun, DENG Ming, TAN Sheng-wu, QIN Can-hua, WANG Shi-ping

(Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It presented a novel power supplying method of electrified railway based on HVDC according to the energy efficiency issues of traditional traction network such as low power factor, high harmonic contents, insufficient grid-voltage and high energy loss. Based on the analysis of solving method for the energy efficiency issues, system topologies of AC and DC traction network were constructed. Using NLM technology, harmonic contents of traction network were analyzed. It discussed dynamic regulation principle of power decoupling technology, researched the improvement of harmonic contents and energy loss of traction network, and compared realization possibility and advantages of the two novel traction network topologies.

Key words: traction supply network; HVDC(high voltage direct current); NLM (nearest level modulation); power decoupling control

0 引言

不同于一般电力系统, 电气化铁道供电系统具有不对称单相牵引负荷, 会造成电力系统三相负荷的不平衡, 对电力系统的运行产生不良影响; 同时, 由于目前国内使用的电力机车作为非线性不对称负载, 普遍存在功率因数低、谐波电流大的问题, 这将直接影响到整个牵引供电系统的正常运行^[1-7]。针对上述电气化铁道供电系统的能效问题, 现有各种解决方案只能解决铁道供电系统的单一能效问题, 不具备综合改善效果。

本文针对传统牵引网的能效问题, 分析了传统解决方案, 提出了一种利用模块化多电平柔性直流输电构建高压直流牵引供电网的方法; 在此基础上提出了基于 HVDC(高压直流输电) 的交流 and 直流两种新型牵引供电网拓扑; 并对利用最近电平逼近技术及功率解耦控制技术改善牵引供电网电能质量的有效性进行了分析, 比较了两种新型牵引网系统拓扑的优劣和实现的可能性。

1 传统牵引供电网的能效问题及解决方法

对于单相牵引供电系统、电力机车负载, 目前电气化铁道供电系统主要存在以下几方面能效问题:

(1) 三相平衡

收稿日期: 2013-08-19

作者简介: 何伯钧(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事 MMC 前沿技术研究、高压变频器设计及试验等工作。

牵引网多提供单相交流电(27.5 kV),不对称的单相牵引负荷会造成三相电力系统的不平衡问题。图1示出传统牵引供电网的系统拓扑。

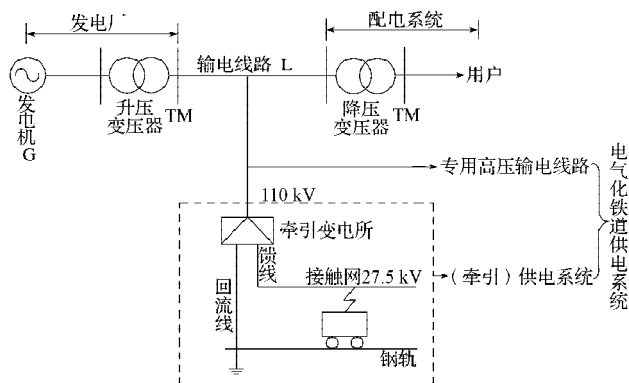


图1 传统牵引供电网系统拓扑

Fig. 1 System topology of traditional traction network

(2) 谐波

直流机车的功率因数低,谐波电流将随基波剧烈波动;谐波在牵引网传播的过程中,一旦牵引网参数与机车负载相匹配,会发生谐振和严重的谐波放大现象^[7-8]。

(3) 线路损耗

供电线路距离的增加,不仅会造成供电线路电能损耗的增加,同时还可能造成牵引网的电压达不到机车负载额定电压的要求。

针对上述能效问题,现有的解决方案主要有:

(1) 通过专用牵引变压器实现有载调压或无载调压,但只能解决网压不足问题;

(2) 采用轮换相序的接线方法减小流入同一牵引系统的总负序电流;

(3) 在牵引变电所或机车负载上安装并联电容补偿装置;

(4) 采用“TCR(晶闸管控制电抗器)+FC(固定电容器)”方式进行动态无功补偿;

(5) 在发电厂或总变电站安装同期调相机,以吸收负序电流,但投资较大;

(6) 采用三相不等容、阻抗匹配或三相四线制牵引变压器解决三相负荷不平衡和负序电流产生的影响^[9-10]。

上述各种解决方案只能解决牵引接触网某一方面的能效问题。若须同时解决电力系统三相负荷不平衡、机车负载功率因数低、接触网与负载谐振、供电线路网压不足等多个接触网电能质量问题,则需综合采用上述解决方案,势必造成系统建设成本和复杂程度的增加。

2 新型牵引供电网系统拓扑

针对传统牵引网存在的各种能效方面问题,本文

提出了一种利用模块化多电平柔性直流输电方式构建高压直流牵引供电网的方法,并在此基础上构建了基于HVDC的交流和直流两种新型牵引供电网拓扑。

2.1 基于HVDC的交流牵引供电系统

基于HVDC的交流牵引供电系统如图2所示,其中L1、L2为换流电抗器;TM1、TM2为换流变压器,用于完成HVDC与电网、负载间的能量传输,TM2的二次侧为单相交流牵引网,为机车负载提供电源;F1、F2为滤波器,用于滤除交流侧谐波。双端MMC(模块化多电平变流器)通过直流输电线路与电力系统相连接,是整个系统的核心部分。其中,MMC1由三相桥臂构成,为HVDC接收端,运行于整流状态;MMC2由两相桥臂构成,为HVDC发送端,运行于单相逆变状态。双端MMC换流站共同实现HVDC同电力系统、机车负载间的有功功率交换以及无功功率补偿调节。

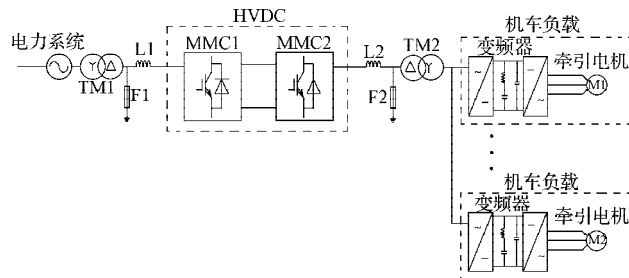


图2 基于HVDC的交流牵引供电系统拓扑

Fig. 2 System topology of the AC traction network based on HVDC

交流牵引网的HVDC拓扑结构如图3所示,该HVDC换流站基于MMC技术。其每个桥臂由 n 个相同的子模块(SM)和一个电抗器串联构成,上、下两个桥臂构成一个相单元^[11-12]。受端换流站MMC1中,a、b、c三相桥臂并联于正、负母线之间,组成三相整流电路;送端换流站MMC2含d、e两相桥臂,构成两相逆变电路。桥臂电抗器可有效地抑制因桥臂直流电压不等而造成的环流;同时能有效抑制因直流母线短路故障造成的交流冲击电流,为IGBT可靠封锁提供充足时间,提高了系统的可靠性。

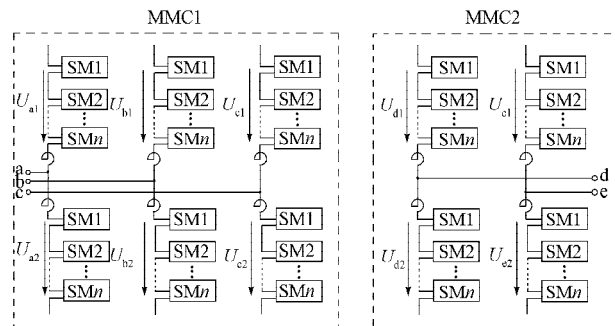


图3 交流牵引供电系统的HVDC拓扑结构

Fig. 3 HVDC topology of the AC traction network

通过IGBT(T1和T2)的通断可控制SM(图4)的输出:

当T1导通时,电容C投入系统,SM输出电平 U_c ;当T2导通时,C从系统中切除,SM输出0电平。储能电容为MMC的正常运行提供一定的直流电压支撑,同时为MMC的交流功率输入与直流功率输出提供缓冲^[13-14]。

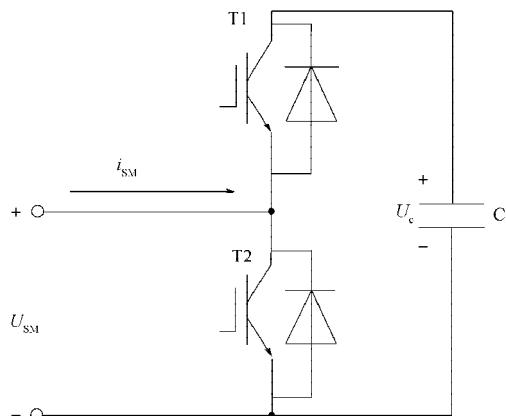


图4 子模块拓扑结构图

Fig. 4 Topology diagram of sub-module

2.2 基于HVDC的直流牵引供电系统

基于HVDC的直流牵引供电系统的基本结构如图5所示。MMC1为HVDC接收端,由三相桥臂构成,将三相交流整流成为直流牵引供电网;MMC2, MMC3, ...,

MMC n 等作为HVDC发送端,分布在各个机车负载中,运行于三相逆变状态,为机车牵引电机直接提供三相电源。

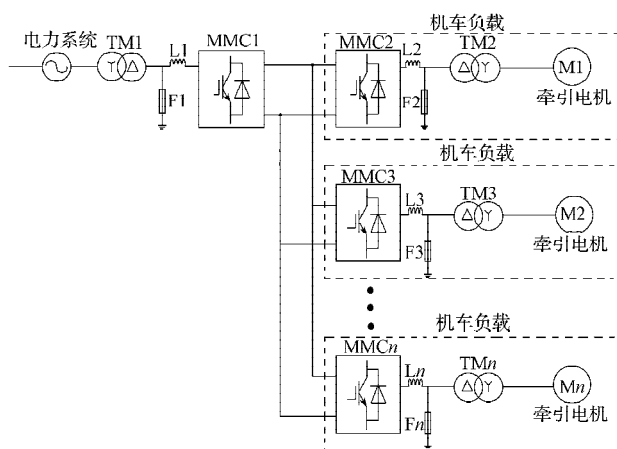


图5 基于HVDC的直流牵引供电系统拓扑

Fig. 5 System topology of the DC traction network based on HVDC

直流牵引供电系统的HVDC拓扑结构如图6所示。与交流牵引供电系统的HVDC拓扑相比,其不同之处在于送端换流站(MMC2、MMC3等)含d、e、f三相桥臂,构成三相逆变电路。

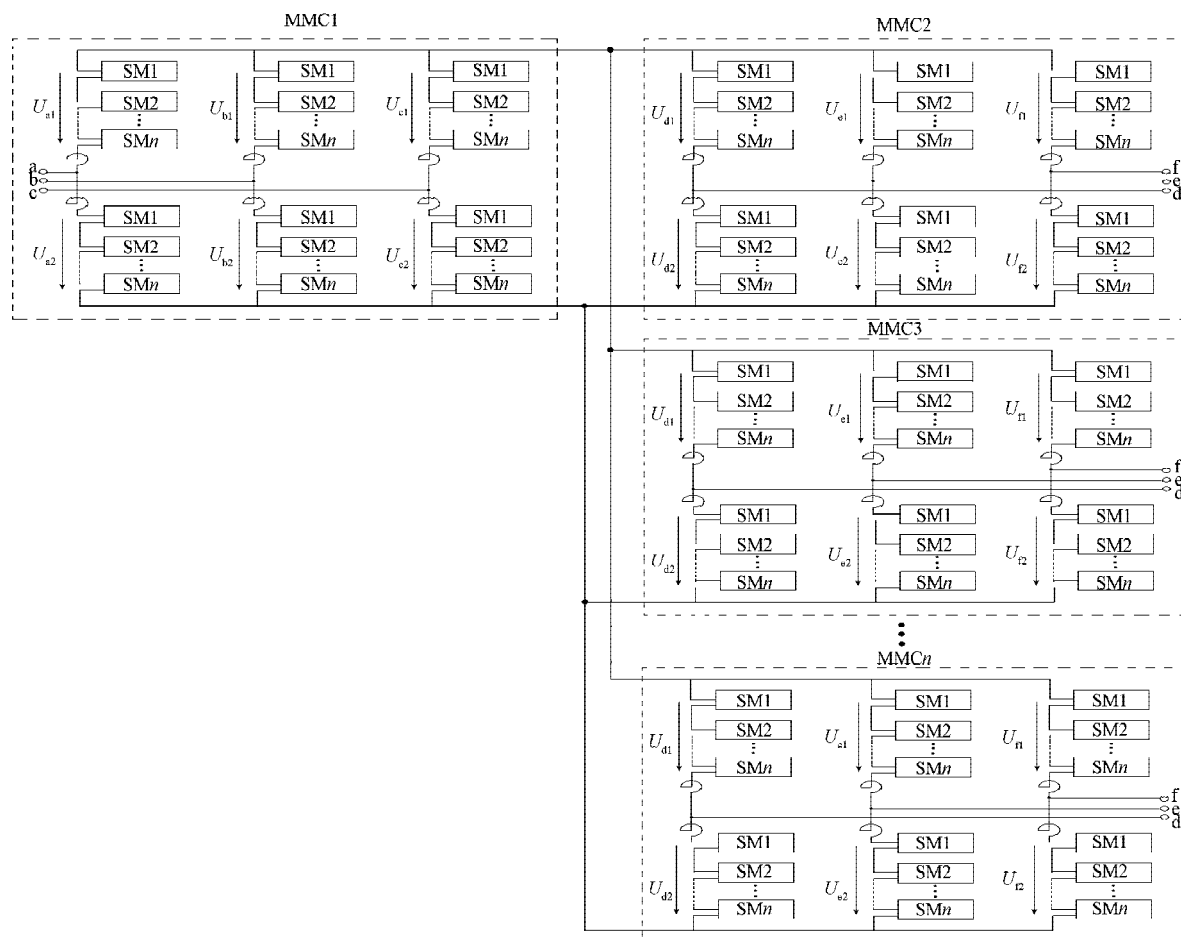


图6 直流牵引供电系统的HVDC拓扑结构

Fig. 6 HVDC topology of the DC traction network

3 牵引网能效问题的改善

针对基于HVDC交流牵引供电网和直流牵引供电网这两种新型电路拓扑,本文通过最近电平逼近调制技术分析了新型拓扑对牵引网、机车负载谐波含量的调节作用,利用功率解耦控制技术推导了其对牵引网无功损耗的补偿作用,并对新型拓扑直流环节的能效改善作用进行了阐述和分析。

3.1 最近电平逼近调制技术改善谐波含量

HVDC采用最近电平逼近调制(NLM)技术来改善牵引网和机车负载谐波含量。由图6可以得到,MMC1的三相桥臂同MMC2的三相桥臂具有相同的直流电压 U_{dc} ,因此相单元中处于投入状态的子模块数相等,使 $U_{a1}+U_{a2}=U_{b1}+U_{b2}=U_{c1}+U_{c2}=U_{d1}+U_{d2}=U_{e1}+U_{e2}=U_{f1}+U_{f2}=U_{dc}$,且投入子模块数保持不变。用 $U_s(t)$ 表示调制波瞬时值, U_c 表示子模块电容电压平均值。每相含有子模块数为 $2n$,每个相单元中有 n 个子模块被投入。在任意时刻,下桥臂和上桥臂需要投入的子模块数 n_{down} 和 n_{up} 可分别表示为^[15]:

$$n_{down} = \frac{n}{2} + \text{round}\left(\frac{U_s}{U_c}\right) \quad (1)$$

$$n_{up} = \frac{n}{2} - \text{round}\left(\frac{U_s}{U_c}\right) \quad (2)$$

式中: $\text{round}(x)$ ——与 x 最接近的整数。

由式(1)和式(2)可知:在任意时刻,每相投入 n 个子模块,MMC即可获得 $(n+1)$ 个电平,即: $n_{down}+n_{up}=n$ 。当 $U_s>0$ 时, $n_{down}>n_{up}$; 当 $U_s<0$ 时, $n_{down}<n_{up}$ 。从拓扑结构及以上分析可知,MMC通过子模块串联可实现较大的电平数,HVDC换流站通过MMC的电压叠加输出高电压,并且利用NLM调制技术,使牵引网和机车负载的谐波含量随电平数的增加而逐渐减少。

3.2 功率解耦控制技术

图7示出换流站功率变换等效电路。图中, X 为换流变压器的电抗值, U_c 为HVDC的基波电压分量, U_s 为牵引网的基波电压分量, δ 为 U_s 和 U_c 之间的相角差, P 和 Q 分别为HVDC同牵引网之间传输的有功功率和无功功率。假设换流变压器无损耗且忽略谐波分量,则:

$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X} \quad (4)$$

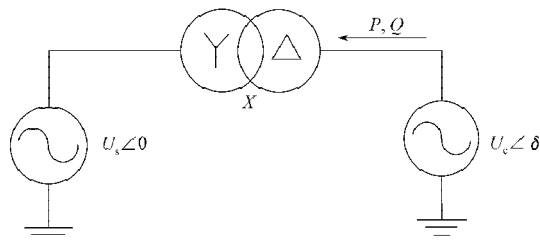


图7 HVDC功率变换等效电路图

Fig. 7 Power transmission equivalent circuit of HVDC

由图7、式(3)及式(4)可以看出,当牵引网交流电压 U_s 一定时,则:

(1)有功功率的传输主要取决于 δ

当 $\delta<0$ 时,HVDC吸收有功功率,运行于整流状态;当 $\delta>0$ 时,HVDC发出有功功率,运行于逆变状态。

(2)无功功率的传输主要取决于 U_c

当 $U_s - U_c \times \cos \delta > 0$ 时,VSC吸收无功功率;当 $U_s - U_c \times \cos \delta < 0$ 时,VSC发出无功功率。

因此,采用基于MMC的HVDC可以方便地调节牵引网和机车负载的有功功率和无功功率,改善系统的运行性能,提高其电能质量。系统补偿牵引网的无功损耗,能起到静止同步补偿器(STATCOM)的作用,稳定牵引网网压。

3.3 直流环节的能效改善

由于直流回路没有电抗,如果采用基于HVDC的直流牵引网,则不存在交流输电的同步运行稳定性问题,且直流牵引网不受输电距离的制约,对保证牵引网和机车负载的稳定运行可起到很大作用。

直流输电线路的损耗小,在导线截面相同、输送有功功率相等的条件下,由于直流架空线路仅使用1根或2根导线,所以直流输电线路的有功损耗较小。同时,直流电缆线路的投资少,在相同条件下,当输电线路长度大于等价距离时,与交流牵引网相比,采用直流牵引网所需的建设费用与运行费用将得以节省。

4 结语

针对传统牵引供电网的能效问题,本文以基于HVDC的交流牵引供电网和基于HVDC的直流牵引供电网两种系统拓扑为基础,研究了NLM技术对牵引网谐波含量的改善问题;通过分析功率解耦控制技术对牵引网有功功率和无功功率动态调节原理,研究了HVDC直流环节对牵引网的谐波含量和能量损耗的改善作用。通过研究发现,基于HVDC的交流牵引供电网仍采用单相27.5 kV交流电压,其对牵引网系统的改造程度较小,但其线路损耗较大,经济性及可实现性仍有待进一步验证。

(下转第41页)

