

文章编号: 1674—8247(2021)03—0091—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.03.016

## 利用双向变流装置的分布式无功补偿系统方案研究

向 往 廖 钧

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**双向变流装置在城市轨道交通工程中的应用是未来行业发展的趋势。本文利用双向变流装置四象限变流的工作特性和多套双向变流装置的协同工作优势,结合城市轨道交通运行特点,制定了分布式无功补偿系统方案,提高了供电系统电能质量,节省了建设成本和运营成本,实现了经济效益最大化。

**关键词:**城市轨道交通;双向变流;分布式;无功补偿;节能

中图分类号:U223.5<sup>+</sup>3 文献标志码:A

### On Scheme of Distributed Reactive Power Compensation System Using a Bidirectional Converter

XIANG Wang LIAO Jun

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The application of bidirectional converter in urban rail transit system is recognized as the trend of future industry development. Making use of the four-quadrant conversion of bidirectional converter and the collaboration of several sets of bidirectional converter, the paper works out a scheme of distributed reactive power compensation system based on the operation characteristics of urban rail transit, to improve the power quality of power supply system, save the construction cost and operation cost, and maximize the economic benefits.

**Key words:** urban rail transit; bidirectional converter; distributed; reactive power compensation; energy saving

目前,国内城市轨道交通工程供电系统典型无功补偿方案为:(1)中高压系统采用集中补偿方式,即在主变电所或电源开闭所设置中压无功补偿装置,中压无功补偿装置采用静止无功发生器(SVG)或 SVG + 并联电抗器,前者由 SVG 承担满足考核点电能质量要求的谐波治理和无功补偿;后者由 SVG 承担谐波治理和城市轨道交通工程内部中压系统的无功补偿,由并联电抗器承担外部电源线路的无功补偿;(2)在各车站、车场降压变电所的 0.4 kV 侧集中设置低压无功补偿装置,低压无功补偿装置通常采用有源滤波装置(APF),承担低压配电系统中的无功补偿和谐波治理;

(3)对于功率因数不高的低压用电设备,采用自备就地无功补偿装置<sup>[1-2]</sup>。

传统中压系统无功补偿方案依赖于设置在主变电所或电源开闭所中压母线的 SVG,虽然能满足电力部门功率因数考核要求,但未实现中压系统无功功率的就地平衡,增加了电压损失及(有功和无功)功率损耗,节能效益不佳,且 SVG 的发热及噪声问题明显。

实现中压系统无功功率就地平衡的理想方法是采用分散补偿方式。分散补偿方式是针对中压系统部分节点的无功平衡,适用于负荷分散的情况,在配电网、铁路电力供配电系统应用广泛<sup>[3-4]</sup>。分散补偿方式便

收稿日期:2021-02-02

作者简介:向往(1988-),男,注册电气工程师。

引文格式:向往,廖钧. 利用双向变流装置的分布式无功补偿系统方案研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(3): 91-96.

XIANG Wang, LIAO Jun. On Scheme of Distributed Reactive Power Compensation System Using a Bidirectional Converter[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 91-96.

于实现中压系统内部无功功率的分区控制、分区平衡,减少中压供电网络线路的有功损耗和电压损失,提高供电半径,经济效益好,但对于外部电源补偿需用量较大的情况,一般不能替代集中补偿方式,且由于无功补偿装置需分散安装,增加了车站(或车场)变电所的电气和土建投资,不利于运营维护与管理。

本文以国内某有轨电车工程为例,提出利用双向变流装置的中压系统无功补偿优化方案。

## 1 工程概况

### 1.1 供电系统概况

(1)供电系统采用 35 kV 分散供电方式,牵引供电系统和动力照明配电系统共用 35 kV 供电网络。牵引供电系统采用 DC1500 V 架空接触网供电、走行钢轨回流方式。

(2)全线共设置 1 座电源开闭所,11 座牵引降压混合变电所(其中正线 10 座,车辆基地 1 座),1 座跟随式降压变电所,如图 1 所示。车辆基地电源开闭所与同址的牵引降压混合变电所整合。

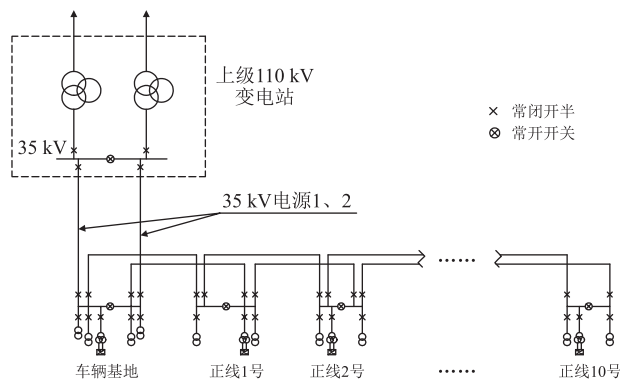


图1 交流供电系统图

(3)上级 110 kV 变电站 35 kV 两段母线各出 1 回 35 kV 线路至车辆基地电源开闭所。外部电源电缆线路长约 0.7 km,电缆截面为 240 mm<sup>2</sup>。功率因数考核点设置在公共连接点(PCC)。

(4)每座牵引变电所分别设置 1 套 1 × 1 650 kVA 双向变流装置,双向变流装置由 1 台变流变压器和 1 面双向变流器柜组成;每座降压变电所设置 2 台配电变压器。

### 1.2 无功负荷和无功电源分析

根据供电系统构成,无功负荷主要来自牵引负荷、动力照明负荷、变压器(变流变压器、配电变压器)及电力电缆的无功损耗,无功电源主要来自电力电缆的充电无功功率。

#### (1)牵引负荷

根据双向变流器低压侧电压幅值、相位可控的特点,理论上牵引负荷功率因数可接近于 1。

#### (2)动力照明负荷

动力照明负荷涉及多个用电设备,总功率因数与各用电设备的负荷大小和设备自身功率因数有关。

#### (3)变压器及电力电缆的无功损耗

变压器、电力电缆线路消耗无功功率。变压器消耗的无功功率分为空载无功损耗和负载无功损耗。

变压器的无功损耗可按式(1)进行计算。

$$\Delta Q_T = \frac{I_0 \% S_r}{100} + \frac{u_k \% S_r}{100} \left( \frac{S_c}{S_r} \right)^2 \quad (1)$$

式中: $\Delta Q_T$ ——变压器中的无功损耗(kvar);

$I_0 \%$ ——变压器空载电流百分数;

$u_k \%$ ——变压器阻抗电压百分数;

$S_c$ ——变压器计算负荷(kVA);

$S_r$ ——变压器额定容量(kVA)。

电力电缆线路的无功损耗可按式(2)计算。

$$\Delta Q_L = 3 I_c^2 x l \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: $Q_L$ ——三相线路中无功损耗(kvar);

$I_c$ ——计算相电流(A);

$x$ ——线路单位长度的交流电抗( $\Omega/\text{km}$ );

$l$ ——线路计算长度(km)。

#### (4)电力电缆线路的充电无功功率

中压供电环网电力电缆及低压电力电缆都能提供充电无功功率,按式(3)进行计算。

$$Q_C = -\omega C_0 U_n^2 l \times 10^3 \quad (3)$$

式中: $Q_C$ ——线路充电无功功率(kvar);

$\omega$ ——角速度(rad/s);

$C_0$ ——线路单位长度等效电容(F/km);

$U_n$ ——系统标称电压(kV);

$l$ ——线路计算长度(km)。

### 1.3 原中压系统无功补偿方案

(1)中压系统采用在电源开闭所设置 SVG 的集中无功补偿方案,结合供电系统内部和外部电源线路,经估算,需设置 2 × 2 Mvar 的 SVG 容量。

(2)每套 SVG 由 1 台隔离变压器和 1 台电压源换流器组成;2 套 SVG 分别通过断路器接于不同段 35 kV 母线。2 台隔离变压器分别设置于独立的隔离变压器室内,2 台电压源换流器设置于 1 间无功补偿装置室内。

## 2 双向变流装置的无功补偿功能

双向变流器属于高功率因数整流器(又称“单位

功率因数整流器”),与采用不可控整流器或相控整流器相比,双向变流装置高功率因数、几乎不产生谐波的特性可从根本上提高系统自然功率因数,减少电网“谐波污染”,改进整流器自身性能<sup>[5-6]</sup>。

双向变流器实质上是四象限运行的 PWM 整流器,除了可以运行于整流、逆变、感性无功补偿和容性无功补偿 4 个特殊的工作状态点外,还可以运行于整流兼感性无功补偿、整流兼容性无功补偿、逆变兼感性无功补偿、逆变兼容性无功补偿 4 种叠加工作状态<sup>[5]</sup>。在无功补偿方面,双向变流装置与 SVG 技术同源,具备感性无功和容性无功双向补偿功能,且具有响应速度快、自身谐波含量小等优点,可满足实际应用需求。同时可根据系统需求进行更为灵活和有针对性的无功补偿方案设计,实现系统的无功功率优化。

### 3 分布式无功补偿

近年来,得益于 SVC、SVG 等动态无功补偿技术的成熟,分布式无功补偿方案在智能配电网和分布式发电领域正日渐兴起,成为一种先进的系统动态分散补偿技术。<sup>[7]</sup>分布式无功补偿方案可根据控制目标自动调节系统各节点的无功补偿容量。不仅可提高中压系统内部各节点功率因数,改善电压损失,实现中压系统内部无功功率的分区控制、分区平衡,减少中压供电网络线路有功损耗,提升经济效益,还可减少无功功率在中压系统节点间的传输,减少集中补偿需用量。

当功率因数考核点设置在 PCC 时,利用靠近考核点无功补偿装置的富余能力,在一定条件下,可取消集中补偿,系统接线如图 2 所示。

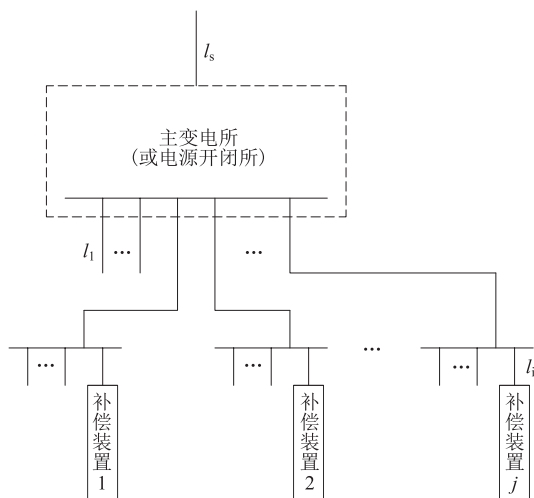


图2 取消集中补偿的系统接线示意图

忽略变压器和电力电缆线路的无功损耗,其判断

条件如式(4)所示。

$$\begin{cases} \omega(U_{n.s}^2 C_{0.s} l_s + U_{n.p}^2 \sum_{i=1}^n C_{0.i} l_i) \times 10^3 \leq \sum_{j=1}^m Q_{L.j} \\ P_c(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \leq \sum_{j=1}^m Q_{C.j} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\omega$ ——角速度(rad/s);

$U_{n.s}$ ——外部电源系统标称电压(kV);

$l_s$ ——外部电源线路计算长度(km);

$C_{0.s}$ ——外部电源线路单位长度等效电容(F/km);

$U_{n.p}$ ——中压供电网络系统标称电压(kV);

$l_i$ ——除外部电源线路外,考核点至无功补偿装置安装位置第*i*段中压供电网络线路的计算长度(km);

$C_{0.i}$ ——除外部电源线路外,考核点至无功补偿装置安装位置第*i*段中压供电网络线路的单位长度等效电容(F/km);

$P_c$ ——考核点最大负荷有功功率(kW);

$\tan\varphi_1$ ——考核点最大负荷功率因数角正切值;

$\tan\varphi_2$ ——考核点要求达到的功率因数角正切值;

$Q_{C.j}$ ——靠近考核点第*j*台无功补偿装置的容性无功补偿剩余容量(kvar);

$Q_{L.j}$ ——靠近考核点第*j*台无功补偿装置的感性无功补偿剩余容量(kvar)。

## 4 中压系统节点功率因数和综合有功损耗

### 4.1 中压系统节点功率因数

在无功补偿前,通过对远期不同行车对数和非运行时段工况进行模拟计算,本文仅列举 35 kV II 段各节点功率因数,如图 2 所示。

图 2 的模拟计算结果表明,中压系统内部无功功率平衡状况与牵引负荷轻重有关,仅当牵引负荷适中时,中压系统内部的无功功率接近自然平衡;在其他时段,均需采用无功补偿措施来改善中压系统内部的无功功率平衡。本文提出利用双向变流装置的工作特性和分散安装条件,实现中压系统内部的无功功率平衡,提高中压系统各节点功率因数。

### 4.2 中压系统综合有功损耗

中压系统中主要由变压器、电力电缆线路产生有功损耗。

变压器有的功损耗可按式(5)计算。

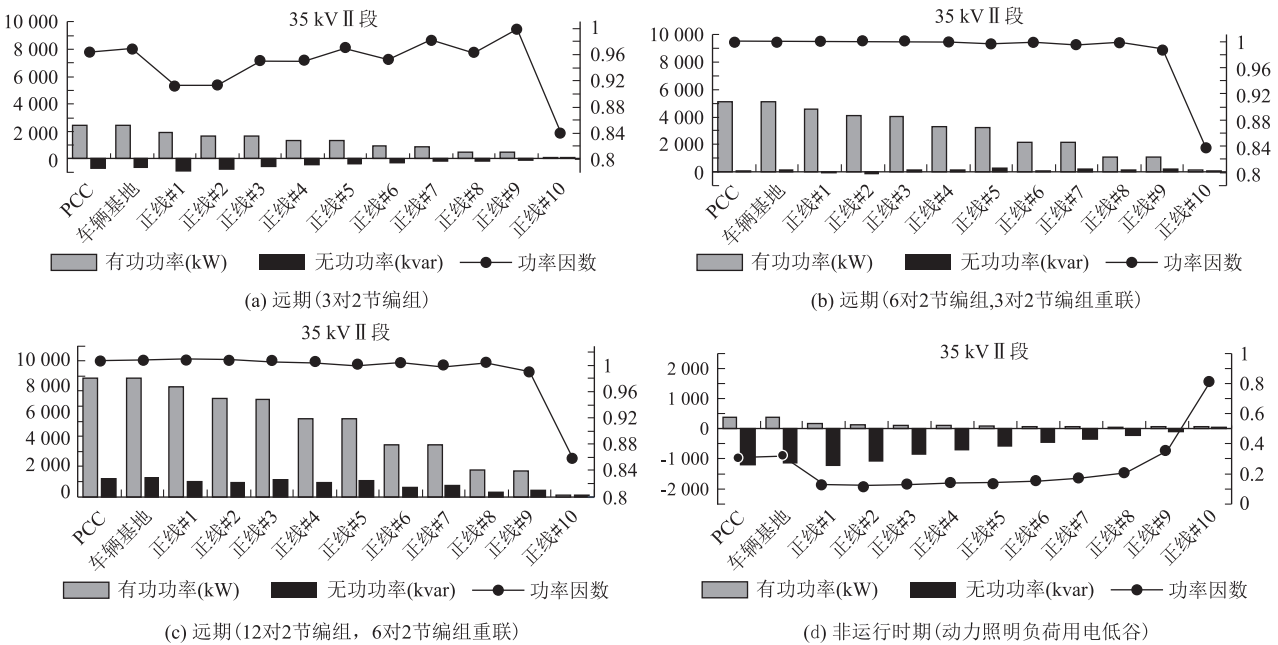


图3 中压系统节点功率因数图

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + P_k \left( \frac{S_c}{S_r} \right)^2 \quad (5)$$

式中: $\Delta P_T$ ——变压器中的有功损耗(kW);  
 $\Delta P_0$ ——变压器空载有功损耗(kW);  
 $\Delta P_k$ ——变压器负载有功损耗(kW);  
 $S_c$ ——变压器计算负荷(kVA);  
 $S_r$ ——变压器额定容量(kVA)。

电力电缆线路的有功损耗可按(6)计算。

$$\Delta P_L = 3 I_c^2 r \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_L$ ——三相线路中无功损耗(kW);  
 $I_c$ ——计算相电流(A);  
 $r$ ——线路单位长度的交流电阻( $\Omega/\text{km}$ );  
 $l$ ——线路计算长度(km)。

配电变压器的有功损耗相对固定。双向变流装置的无功补偿作用使电力电缆线路的负载电流和有功损耗减少、变流变压器的负载电流增大、有功损耗增加。中压系统综合有功损耗的增减主要由变流变压器和电力电缆线路的有功损耗决定。

5 优化方案

5.1 优化思路

- (1) 以分区补偿、就地平衡为原则。
- (2) 以满足电力部门考核功率因数要求为前提,并且不向电力系统倒送无功功率(过补偿):在运行时段,功率因数 $\geq 0.95$ (滞后),在非运行时段,功率因数 $\leq 0.95$ (滞后)<sup>[8]</sup>。

(3) 尽量减少中压系统内部综合有功损耗。

5.2 补偿策略构思

在满足 PCC 总功率因数考核要求的前提下,按照分布式无功补偿的不同控制目标,本文提出两种策略。

(1) 局部补偿策略

分布式无功补偿从局部角度出发,以各套双向变流装置所在 35 kV 母线均达到目标功率因数为控制目标。

(2) 全局补偿策略

分布式无功补偿从全局角度出发,以减少中压系统综合有功损耗为控制目标。全局补偿策略可有多种规则,其中一个较简单的规则是:从中压系统末端节点开始,顺次判断相应节点是否需要无功补偿。假设使该节点位置的双向变流装置所在 35 kV 母线达到目标功率因数,若该节点位置的双向变流装置的无功补偿出力将不会引起中压系统的综合有功损耗增加,则该节点位置的双向变流装置进行无功补偿;反之,则该节点位置的双向变流装置不进行无功补偿。此后再判断倒数第二个节点位置是否需要无功补偿,并以此类推。

5.3 补偿策略初步分析

根据牵引供电系统模拟计算结果,对远期、非运行时段中压系统分别采用 SVG 集中补偿方案、局部分布式补偿方案和全局分布式补偿方案的节能效果进行了估算,分别如表 1、表 2 所示。

表 1  三种无功补偿方案节能效果对比表( 远期)

项目	35 kV 母线	PCC 总有功功率 /kW	PCC 总无功功率 /kvar	PCC 总功率因数	中压系统综合有功损耗/kW	节能 /kW	中压系统综合有功损耗减少比例/%
3 对 2 节编组							
补偿前	I 段	2 911	- 583	0. 981	119. 67	-	-
	II 段	2 452	- 675	0. 964			
SVG 集中补偿后	I 段	2 922	5	1. 000	143. 5	- 23. 9	- 19. 95
	II 段	2 464	5	1. 000			
局部分布式补偿后	I 段	2 911	1	1. 000	121. 55	- 1. 9	- 1. 57
	II 段	2 453	250	0. 995			
全局分布式补偿后	I 段	2 910	1	1. 000	118. 30	1. 4	1. 14
	II 段	2 451	250	0. 995			
6 对 2 节编组,3 对 2 节编组重联							
补偿前	I 段	5 658	201	0. 999	218. 0	-	-
	II 段	5 128	92	1. 000			
SVG 集中补偿后	I 段	5 665	3	1. 000	231. 0	- 13. 1	- 5. 99
	II 段	5 134	3	1. 000			
局部分布式补偿后	I 段	5 658	4	1. 000	219. 1	- 1. 1	- 0. 50
	II 段	5 129	252	0. 999			
全局分布式补偿后	I 段	5 658	4	1. 000	218. 0	0	0. 00
	II 段	5 128	252	0. 999			
12 对 2 节编组,6 对 2 节编组重联							
补偿前	I 段	8 820	1 432	0. 987	408. 9	-	-
	II 段	7 838	1 204	0. 988			
SVG 集中补偿后	I 段	8 850	37	1. 000	463. 4	- 54. 5	- 13. 33%
	II 段	7 862	26	1. 000			
局部分布式补偿后	I 段	8 816	9	1. 000	402. 5	6. 4	1. 56%
	II 段	7 835	256	0. 999			
全局分布式补偿后	I 段	8 816	9	1. 000	402. 5	6. 4	1. 56%
	II 段	7 835	256	0. 999			

表 2  三种无功补偿方案节能效果对比表( 非运行时段)

项目	35 kV 母线	PCC 总有功功率 /kW	PCC 总无功功率 /kvar	PCC 总功率因数	中压系统综合有功损耗 /kW	节能 /kW	中压系统综合有功损耗减少比例/%
动力照明负荷用电低谷							
补偿前	I 段	383	- 1188	0. 307	90. 1	-	-
	II 段	380	- 1197	0. 303			
SVG 集中补偿后	I 段	407	131	0. 952	136. 9	- 46. 8	- 51. 93
	II 段	404	130	0. 952			
局部分布式补偿后	I 段	395	128	0. 951	91. 3	- 1. 2	- 1. 31
	II 段	391	128	0. 950			
全局分布式补偿后	I 段	394	126	0. 953	90. 8	- 0. 7	- 0. 76
	II 段	391	135	0. 945			

表 1、表 2 的模拟计算结果表明,中压系统采用双向变流装置的分布式无功补偿可满足电力部门对 PCC 总功率因数的考核要求,且不向电力系统倒送无功功率(过补偿),可替代采用 SVG 集中补偿。

按照“无功功率就地平衡”的思路,局部分布式无功补偿是无功补偿的最理想方案<sup>[6]</sup>,对系统参数不敏

感,不需要多套双向变流装置协同工作,实现方法简单,能够减少中压系统电力电缆线路有功损耗。但双向变流装置的无功补偿出力将影响其视在功率,使其负载电流和有功损耗增加,由此引起中压系统的综合有功损耗增加,在节能方面有些得不偿失。

全局分布式无功补偿方案存在对系统参数较敏感、需要全线的双向变流装置协同工作、实现方法较复杂等缺点,但从全局角度出发,能够减少中压系统综合有功损耗,经济效益更优。

5.4  无功补偿容量

根据牵引供电系统模拟计算结果,按照满足 PCC 总功率因数考核要求,对远期高峰时段、非运行时段(动力照明用电低谷)的无功补偿需用量和双向变流装置需用容量进行了估算,结果如表 3、表 4 所示。

表 3  无功补偿需用量估算表( 远期高峰时段)

电源开闭所/变电所代号	有功功率 /kW	无功功率 /kvar	双向变流装置需用容量/kVA	备注
车辆基地	800	- 115	808	容性
正线#1	716	360	802	感性
正线#2	1 236	194	1 251	感性
正线#3	1 227	100	1 231	感性
正线#4	1 395	18	1 395	感性
正线#5	1 659	- 64	1 660	容性
正线#6	1 659	- 64	1 660	容性
正线#7	1 659	- 64	1 660	容性
正线#8	1 659	- 65	1 660	容性
正线#9	1 653	- 208	1 666	容性
正线#10	1 130	- 171	1 143	容性

注:表中双向变流装置需用容量未考虑其过负荷能力

表 4  无功补偿需用量估算表( 非运行时段)

电源开闭所/变电所代号	有功功率 /kW	无功功率 /kvar	双向变流装置需用容量/kVA	备注
车辆基地	2	238	238	感性
正线#1	4	465	465	感性
正线#2	3	368	368	感性
正线#3	2	273	273	感性
正线#4	2	236	236	感性
正线#5	2	240	240	感性
正线#6	2	240	240	感性
正线#7	2	242	242	感性
正线#8	2	243	243	感性
正线#9	1	102	102	感性
正线#10	0	- 23	23	容性

注:表中双向变流装置需用容量未考虑其过负荷能力

表 3、表 4 模拟计算结果表明,双向变流装置容量满足整流兼无功补偿(或逆变兼无功补偿)的工作要求。



5.5 方案对比

(1) 电能质量

根据牵引供电系统模拟计算结果,对远期高峰时段中压系统采用 SVG 的集中无功补偿后与采用局部分布式补偿后的中压网络累计电压损失进行了对比,结果如表 5 所示。

表 5 中压网络累计电压损失对比表

电源开闭所/ 变电所代号	I 段		II 段	
	SVG 集中 补偿/%	局部分布式 补偿/%	SVG 集中 补偿/%	局部分布式 补偿/%
车辆基地	0.01	0.01	0.01	0.01
正线#1	0.19	0.17	0.17	0.16
正线#2	0.59	0.51	0.56	0.50
正线#3	1.10	0.95	1.00	0.94
正线#4	1.42	1.28	1.35	1.23
正线#5	1.67	1.49	1.56	1.45
正线#6	1.86	1.70	1.78	1.63
正线#7	2.05	1.86	1.92	1.81
正线#8	2.17	2.02	2.06	1.92
正线#9	2.29	2.11	2.13	2.04
正线#10	2.34	2.21	2.21	2.10

从表 5 可以看出,采用全局分布式补偿方案仅在部分节点进行无功补偿,其中压供电网络电压损失介于 SVG 集中补偿方案与局部分布式补偿方案之间。中压系统采用分布式无功补偿方案后,能进一步降低中压供电网络的电压损失。

(2) 建设成本

分布式无功补偿方案替代 SVG 集中无功补偿方案后,可减少 2 套 SVG、2 面 40.5 kV GIS 开关柜、2 套 35 kV 电流保护装置及相关设备之间的连接电缆,并能取消隔离变压器室、无功补偿装置室配套的通风、动力照明等机电设施,合计节约建设成本约 450 万元。

(3) 运营成本

分布式无功补偿方案替代 SVG 集中无功补偿方案后,完全消除了 SVG 的有功损耗,在无功补偿方面可付出更小的有功“代价”,并减少了中压供电网络电力电缆线路的有功损耗。运营各期节省的用电量估算如表 6 所示。

表 6 运营各期两种分布式补偿方案全年节能表

年限	局部分布式补偿全年 节能/( $\times 10^4$ kWh)	全局分布式补偿全年 节能/( $\times 10^4$ kWh)
初期	12.78	14.02
近期	14.55	15.45
远期	17.49	18.26
系统规模	18.58	19.41

以 30 a 运营期估算,当分布式无功补偿采用局部补偿策略时,节省电费约 250 万元;当分布式无功补偿采用全局补偿策略时,节省电费约 265 万元,节能效果提升约 5%。

(4) 其他

目前,国内 SVG 大多采用强迫风冷散热方式,存在设备用房排热量大、装置噪声大等缺点。分布式无功补偿方案替代 SVG 集中无功补偿方案将有助于创造更良好的运营环境。

6 结论与展望

本文利用双向变流装置四象限变流的工作特性和多套双向变流装置的协同工作优势,结合城市轨道交通运行特点,制定了分布式无功补偿系统方案,研究得出以下主要结论:

(1) 城市轨道交通中压系统采用双向变流装置的分布式无功补偿方案可满足电力部门功率因数考核要求,且双向变流装置的无功补偿出力较小,不影响其设备安装容量选择。

(2) 利用双向变流装置进行分布式无功补偿可减少集中补偿需用量,在一定条件下,甚至可取消集中补偿,在电能质量、建设成本、运营成本、运营环境等方面均优于仅采用集中无功补偿方案。

(3) 城市轨道交通供电系统采用双向变流装置,除利用其高功率因数特性及逆变功能外,还可采用分布式无功补偿方案挖掘系统节能潜力,并充分发挥多套双向变流装置的协同工作优势,实现经济效益最大化。

无功功率优化问题是一个多变量、多约束的混合非线性规划问题,因此,适用于城市轨道交通工程供电系统的分布式无功补偿策略还有待进一步优化和完善。

参考文献:

[1] 廖钧. 城市轨道供电系统无功补偿方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

LIAO Jun. Research on Reactive Power Compensation Scheme of Urban Rail Power Supply System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[2] 陈飞. 轨道交通供电系统功率因数分析及补偿方案研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(4): 100-103.

CHEN Fei. Analysis of Power Factor for Power Supply System of Urban Rail Transit and Research on the Method of Compensation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(4): 100-103.

洞的工程案例进行分析,得出以下结论:

(1)目前,我国高速铁路隧道普遍采用帽檐斜切式洞门,帽檐高度高出拱顶2 m,在接长明洞时如果要保留帽檐结构,则明洞结构高度要比传统明洞高出2 m。采用框架棚洞和拱形明洞两种结构类型均可实现接长明洞的目的,但比较后认为拱形明洞结构更加合理。

(2)通过吊装H型钢完成明洞主骨架安装,然后将纤维钢筋混凝土板国内首次应用通过螺栓固定在型钢骨架上,混凝土内模与结构合二为一,在主体结构及工艺工法上较好地解决了拱形明洞结构受力及内模安装难题。

(3)隧道洞口接长明洞工程在我国高速铁路建设过程中极为普遍,尤其是联调阶段、甚至是运营阶段,均会遇到大量的此类工程。这就要求尽量实现场外预制,现场吊装安装,以最大限度地减少对运营的干扰。建议今后还应考虑山高谷深桥隧相连的地段,在桥梁设计时统筹考虑在梁部设置明洞的方案。

## 参考文献:

- [1] 赵秋林. 兰渝铁路范家坪隧道出口危岩落石分析及防护设计[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 137-140.  
ZHAO Qiulin. Analysis and Protection Design of Fanjiaping Tunnel Exit Rockfall on Lanzhou-Chongqing Railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(10): 137-140.
- [2] 张永平. 运营隧道非常规方法接长明洞设计及施工[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(2): 37-40.  
ZHANG Yongping. Design and Construction of Extending Operating Tunnel with Unconventional Method[J]. High Speed Railway

Technology, 2014, 5(2): 37-40.

- [3] 董振杰. 既有电气化铁路隧道明洞接长施工关键技术及经济分析[J]. 铁道建筑技术, 2016(8): 124-127.  
DONG Zhenjie. Key Technology and Economic Analysis for Tunnel Extending Construction of In-Service Electrified Railway[J]. Railway Construction Technology, 2016(8): 124-127.
- [4] 李品福. 既有铁路隧道接长明洞施工技术研究[J]. 铁道标准设计, 2005, 49(10): 99-100.  
LI Pinfu. Research on Construction Technology of Existing Railway Tunnel Connecting Changming Cave[J]. Railway Standard Design, 2005, 49(10): 99-100.
- [5] 王昭晖. 铁路运营隧道接长明洞方案研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(13): 185-186.  
WANG Zhaohui. The Tunnel Extending Open Cut Ones for Railway Operation Scheme Research[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(13): 185-186.
- [6] 高树峰. 隧道洞口间明洞连接技术探讨[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(6): 68-71.  
GAO Shufeng. Exploration on the Connect Technology between the Two Open Cut Tunnels' Entrance[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(6): 68-71.
- [7] 王兴林. 铁路运营线隧道口新增拱形明洞施工技术[J]. 科技资讯, 2011, 9(21): 123-124.  
WANG Xinglin. New Construction Technology of Arched Open Tunnel at Tunnel Mouth of Railway Operation line[J]. Science & Technology Information, 2011, 9(21): 123-124.
- [8] 咎爱琴. 郑西客运专线黄土隧道半装配式拱形明洞接长施工技术[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(S1): 118-119.  
ZAN Aiqin. Construction Technology of Semi-fabricated Arched Open Tunnel Extension in loess Tunnel of Zhengzhou-Xi'an Passenger Dedicated Line[J]. Railway Standard Design, 2010, 54(S1): 118-119.

(上接第96页)

- [3] 张凉永. 高速铁路全电缆电力贯通线的电容电流及其容性无功补偿分析[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(1): 27-31.  
ZHANG Liangyong. Analysis of Capacitive Current and Capacitive Reactive Compensation in the Medium-Voltage of All-Cable through Line on High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(1): 27-31.
- [4] 季昉. 池黄铁路电力供电系统设计研究[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(5): 29-35.  
JI Fang. Research on the Design of Electric Power Supply and Distribution System in Chizhou Huangshan High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(5): 29-35.
- [5] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. PWM Rectifier and its Control[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

- [6] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. WANG Zhaoan. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [7] 徐雄风. 含分布式电源的配电网无功优化研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.  
XU Xiongfeng. Research on Reactive Power Optimization of Distribution Network with Distributed Generation[D]. Huainan, China: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [8] DL/T 1773-2017 电力系统电压和无功电力技术导则[S].  
DL/T 1773-2017 Technical Guide for Electric Power System Voltage and Reactive Compensation[S].