双流制牵引变电所接线方案研究

周 娟

（中铁工程设计咨询集团有限公司，北京 100055）

摘要：通过对双流制牵引变电所的研究，提出了3种不同的双流制牵引变电所的接线方案，并对其适用情况进行了对比分析，提出了不同建设条件下双流制牵引变电所接线的设置方案，并阐述了在接线设置中需要注意的问题。

关键词：双流制；牵引变电所；接线

Study on the wiring scheme of double-current traction substation

ZHOU Juan

(China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: Based on the research of the double-current traction substation, three different kinds of wiring schemes of the double-current traction substation are put forward, and the applicable conditions are compared and analyzed, the wiring schemes of the double-current traction substation under different construction conditions are put forward, and the problems needing to pay attention in the wiring setup are expounded.

Key words: double-current system; traction substation; wiring

0 引言

目前，我国城市轨道交通供电系统的牵引变电所和电气化铁道供电系统的牵引变电所普遍采用单一供电制式，城市轨道交通普遍采用直流1 500 V或直流750 V供电，电气化铁道普遍采用交流27.5 kV或交流2×27.5 kV供电。

近年来，随着我国轨道交通和电气化铁道的快速发展，城际铁路、市域铁路和城市轨道交通等线路互联互通，出现了一些不同交通型式交汇的地方，或者有些调试线、试验线等需要双流制供电的地方，传统的单一供电制式已无法满足双流制供电的需要。因此，有必要对双流制牵引变电所进行研究。

1 交流和直流共用进线按轨道交通常用电源等级引入

轨道交通外电电源受地方电网电源条件影响，常采用10 kV、20 kV或35 kV。以轨道交通外电电源作为双流制牵引变电所交流、直流系统的共用进线进行接线，接线示意图如图1所示。

电源进线侧采用单母线分段接线方式，两段母线间通过母联断路器互联。变电所可根据现场电源条件采用一路电源，也可以根据现场整体情况考虑开闭所的设置条件。每段母线均设置馈线，向配电变压器、整流变压器和三相变单相变压器供电。

变电所设置两套整流机组，通过断路器并

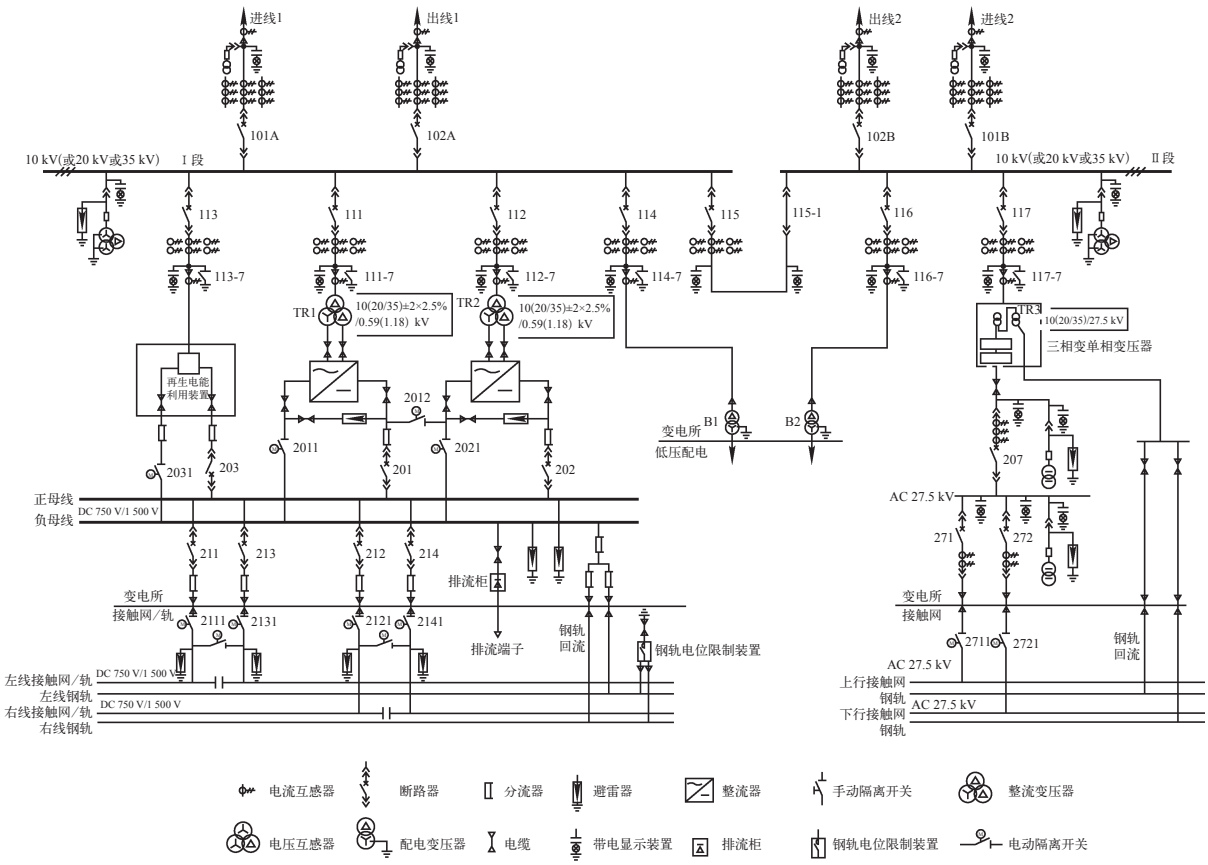


图1　交、直流共用进线按轨道交通常用电源等级引入接线示意图

Fig. 1 Wiring schematic diagram of AC and DC shared incoming line according to the common power level of rail transit

接于同一段中压母线。配电变压器分别设置于不同的母线上，三相变单相变压器设置于一段母线上（根据负荷情况设置）。

根据需要设置相应的再生能馈装置。

1.1　DC 750/1 500 V实现方式

首先合上相应的10（20/35）kV开关。

（1）DC 750 V

整流变压器参数采用10（20/35）/ 0.59 kV，2012隔离开关为分位，201、2011、202和2021均为合位，合相应直流馈线开关。

（2）DC 1 500 V

整流变压器采用10（20/35）/ 0.59 kV，2012隔离开关为合位， 2011、202均为合位，2021、201为分位，合相应直流馈线开关。

如果直流只采用一种制式DC 1 500 V，整流变压器参数可调整为10（20/35）/1.18 kV。

1.2　AC 27.5 kV

合207，合相应交流馈线开关。

交直流进线电源回路数（1路或2路）、供电方式（27.5 kV或2×27.5 kV）、馈线回路数和是否设置分段母线等根据工程条件确定。

1.3　三相变单相变压器

由于电气化铁道牵引供电采用单相工频的供电方式，造成电力系统三相负载不对称。按轨道交通常用电源等级10（20/35）kV作为进线电源，通常进线短路容量较常规电气化铁道进线电源110（220/330）kV短路容量小，因而负序问题更加突出。

如何解决电气化铁道引起的负序问题，近年来国内外的研究、实践主要集中在采用对称补偿的特殊接线的三相变单相变压器方案和采用基于有源滤波器的三相变单相变压器方案。

1.3.1 采用对称补偿的特殊接线

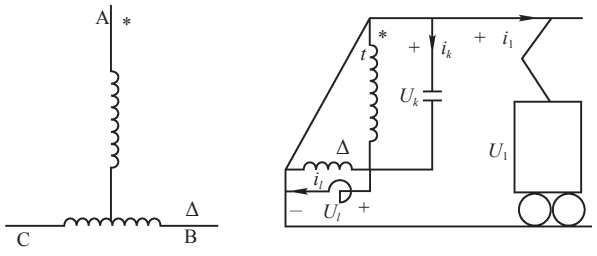
对于采用对称补偿的特殊接线，文献[1]提出了不等边Scott接线，通过与Scott、YNd11和Vv接线的比较，指出它在补偿装置容量、接线结构和可控性上具有优越性，并给出了小规模试验测试结果。文献[2]讨论了用YNd11接线变压器进行对称补偿的不同实现模式，文献[3-5]分别提出了不等边Vv接线、YN2d接线、YNvd接线。

以不等边Scott接线为例，其接线原理与向量图如图2所示[1]。为满足一定的负序补偿度K_N和无功补偿度K_C（当两者取1时即可完全补偿负序和无功），夹角θ和k、l端口投入的容性和感性补偿容量应分别随牵引负荷按式（1）、式（2）变化，即

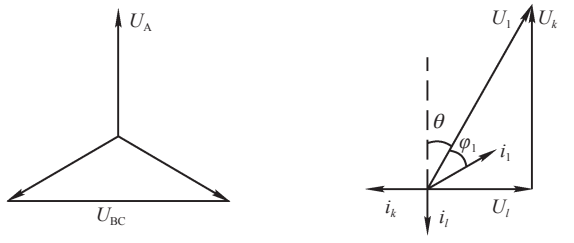
$$\theta=45^{\circ}-\frac{\varphi_1}{2} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} sc&=\frac{1}{2}(K_N+K_C\sin\varphi_1)s_1\\ sl&=\frac{1}{2}(K_N-K_C\sin\varphi_1)s_1 \end{aligned} \tag{2}$$

式中，s_1为牵引负荷容量；φ_1为牵引负荷功率因数角。



(a)接线原理



(b)向量图

图2　不等边Scott接线

Fig. 2 Unequal Scott wiring

考虑到牵引负荷功率因数的波动性，为减少技术难度，可按平均功率因数确定θ值，而不调整绕组。

对称补偿后剩余的负序[6]为

$$s\sum^{(-)}=s_1\sqrt{1+k_s^2-2k_s\cos(90^o-2\theta-\varphi_1)} \tag{3}$$

式中，$k_s=(sc+sl)/s_1$。

可得如下方程。

（1）未补偿

$$s\sum^{(-)}=s_1\sqrt{1+k_s^2-2k_s\cos(90^o-2\theta-\varphi_1)}=s_1\sqrt{1+0-0}=s_1 \tag{4}$$

若负序满足条件，需要符合$s_1\leqslant\varepsilon_U s_d$。

式中，ε_U为变电所进线所允许的电压不平衡度；s_d为牵引变电所进线短路容量。

（2）按sc、sl进行补偿

若负序满足条件，需要符合：$s_1\leqslant\varepsilon_U s_d/(1-k_s)$。

（3）全补偿

$$s\sum^{(-)}=0 \tag{5}$$

全补偿时，负序满足要求：$0\leqslant\varepsilon_U s_d$

由以上公式可得，未实现全补偿时，负荷容量越大，负荷对电力系统负序影响越大；负荷及系统短路容量确定后，负荷对电力系统的影响与补偿容量有关，越接近全补偿，对系统的负序影响越小。

另外，需注意到补偿无功不宜出现过补偿，因而应选择合适的补偿容量。

对于负序、无功及电压损失较大的牵引变电所，可以通过设置可调补偿器实现完善补偿。

1.3.2 基于有源滤波器的方案

基于有源滤波器的平衡变换技术不仅能达到三相平衡供电的目的，而且能动态补偿谐波和无功。将有源滤波器和不同的接线方式变压器有机结合，也可构建基于有源滤波器的同相牵引供电系统。

以不等边Scott接线为例，采用基于有源滤波器的平衡变换装置如图3所示。变压器采用其他方式、线路采用其他供电方式（2×27.5 kV）时，接线相应调整。

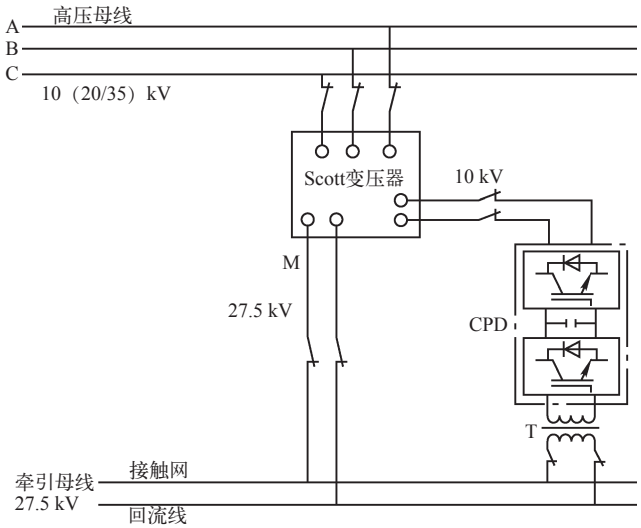


图3　采用不等边Scott接线的有源滤波器设置方案

Fig. 3 Active filter setup scheme using unequal Scott wiring

2　从所外引入27.5（2×27.5）kV交流进线电源

根据现场建设条件，如果牵引变电所附近有其他交流牵引变电所馈出27.5（2×27.5）kV馈线，或者临近线27.5（2×27.5）kV接触网线路距离不远，根据工程实际，则27.5（2×27.5）kV电源可考虑取自其他交流牵引变电所或27.5（2×27.5）kV接触网，如图4所示。

图4中，按27.5 kV交流进线引入，若采用2×27.5 kV制式，接线相应调整。进线电源回路数（1路或2路）、供电方式（27.5 kV或2×27.5 kV）和馈线回路数和是否设置分段母线等根据工程条件确定。

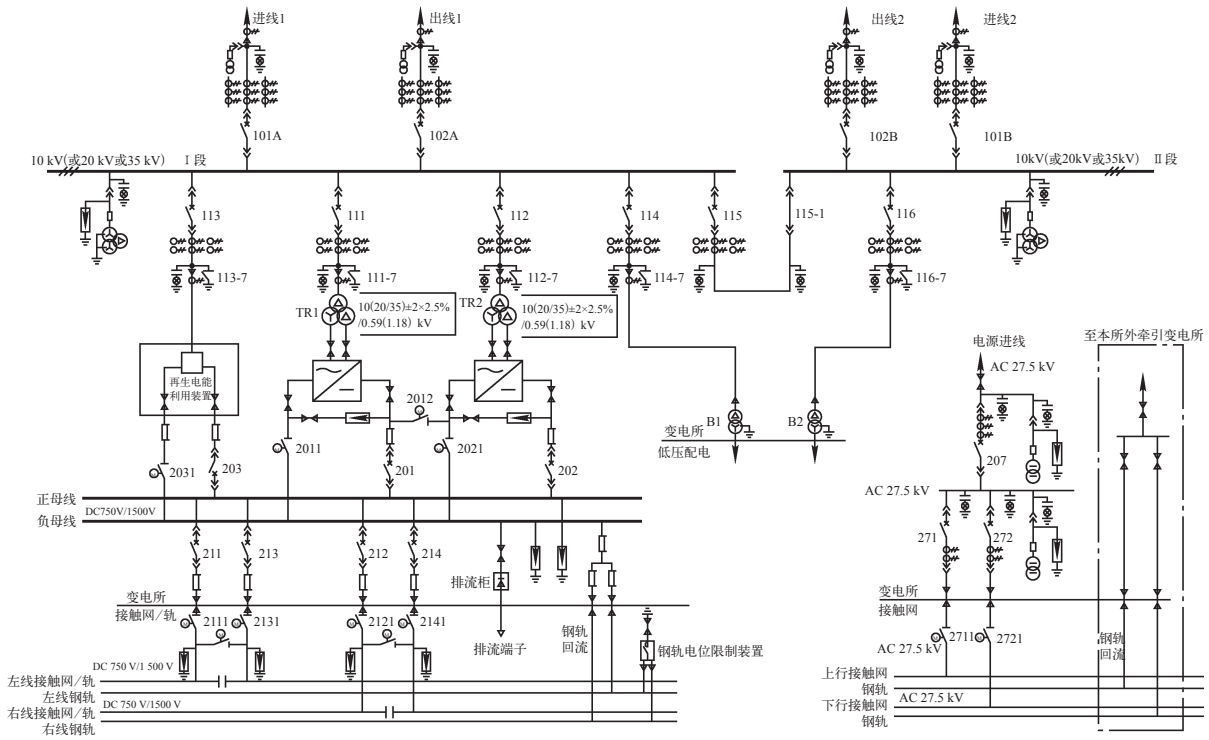


图4　从所外引入27.5 kV交流进线电源接线示意图

Fig. 4 Wiring schematic diagram of 27.5 kV AC incoming power line from outside the substation

3　交流和直流共用进线按电气化铁道常用电源等级引入

当交流机车负荷较大时，10（20/35）kV的电源容量、电能质量及电源可靠性不能满足要求，可按常规电气化铁道牵引变电所的进线电源等级引入进线，如图5所示。

图5中引入电源电压等级为220 kV，电源电压等级根据地方电源条件、负荷条件等综合确定，也可以根据条件调整为110 kV或者330 kV。

图5中，1B、2B、3B和4B为牵引变压器，可根据条件选择单相变压器、三相Vv

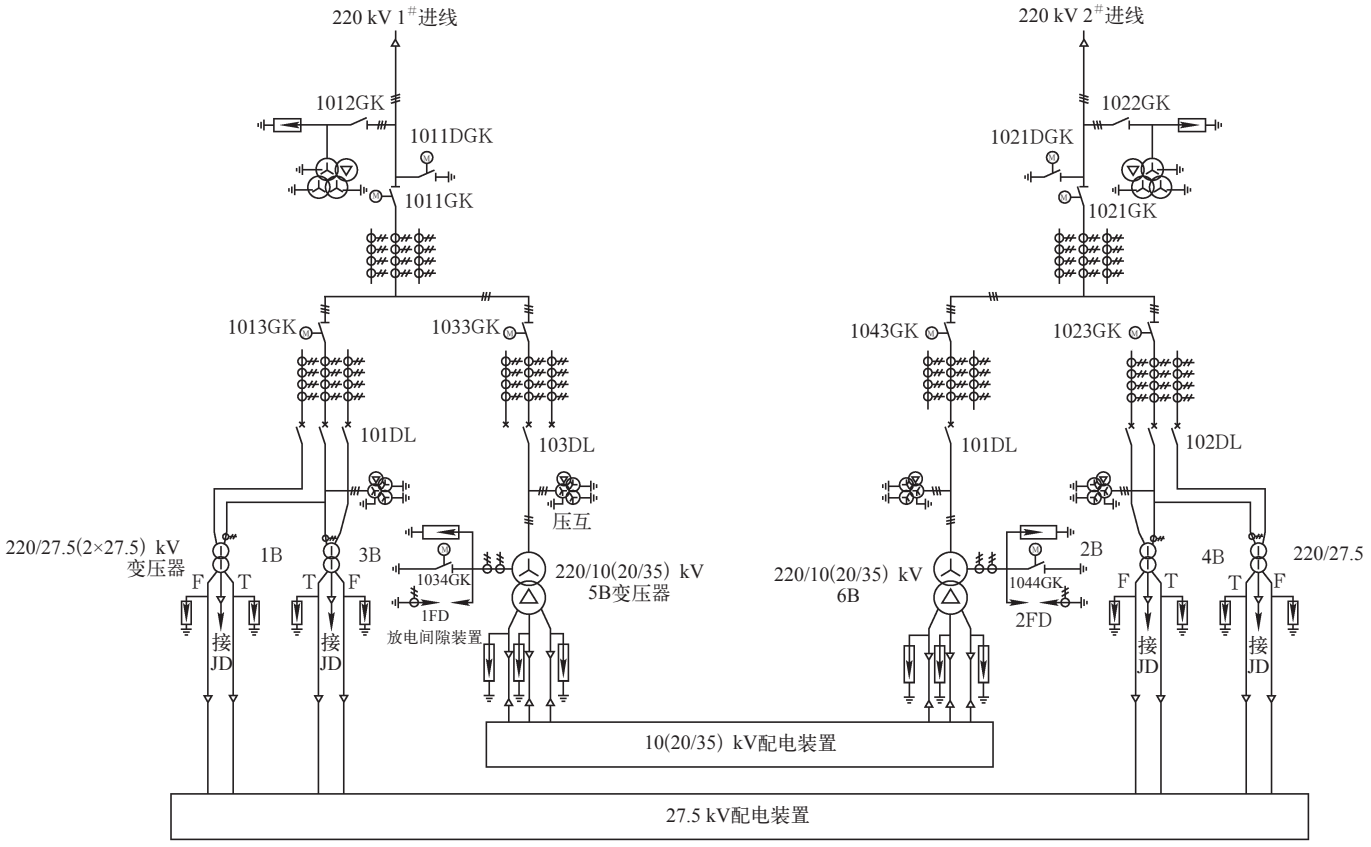


图5 交、直流共用进线按电气化铁道常用电源等级引入接线示意图

Fig. 5 Wiring schematic diagram of AC and DC shared incoming line according to the common power level of electric railway

变压器、Vx变压器和斯科特变压器等，输出27.5 kV或者2×27.5 kV电压，作为交流27.5 kV或2×27.5 kV馈线的进线电源。5B、6B为三相变压器，可根据需要由220 kV变压器变压出10（20/35）kV电压，作为直流部分的进线电源。引入电源后的直流部分可参照图4中直流部分设置，馈出直流馈线。交流部分参照图4中交流部分进行设置，进线电源回路数（1路或2路）、供电方式（27.5 kV或2×27.5 kV）、馈线回路数和是否设置分段母线等根据工程条件确定。

4 接线方案比较

双流制牵引变电所接线方案比较如下表所示。

5 需要注意的问题

1）整流变压器的选择。需要既输出DC 750 V，又输出DC 1 500 V时，牵引变压器按10（20/35）/0.59 kV设置，通过开关的串并联可分别实现DC 750 V/DC 1 500 V电压输出。如果只需要实现DC 750 V，整流变压器低压侧可选择0.59 kV；如果只需要实现DC 1 500 V，整流变压器低压侧可选择1.18 kV。

2）直流2012开关的设置。需要设置DC 750 V和DC 1 500 V两种制式时，设置直流2012开关。一种制式时，不需要设置直流2012开关。

3）直流设备参数的选择。需要既输出DC 750 V又需要输出DC 1 500 V时，设备、电缆等回路里的电流参数、电压参数等应按两种电压工况下最大分别予以考虑。只需要一种制式输出时，按一种制式输出的考虑。

4）三相变单相变压器的设置。通常，对负荷较轻的线路，采用对称补偿技术，可减少费用；对负荷较重的线路，可采用基于有源滤

表　双流制牵引变电所接线方案比较

Tab. Wiring schemes comparison of double-current traction substation

对比分析 \ 接线方案	交、直流共用进线按轨道交通常用电源等级引入（方案一）	从所外引入27.5（2×27.5）kV交流进线电源（方案二）	交、直流共用进线按电气化铁道常用电源等级引入（方案三）
常用电源等级	10 kV、20 kV和35 kV	直流10 kV、20 kV、35 kV和交流27.5 kV	110 kV、220 kV和330 kV
设备配置	10（20/35）kV设备、10（20/35）kV/0.59（1.18）kV变压器、直流设备、三相变单相变压器、27.5（2×27.5）kV设备及其他设备	10（20/35）kV设备、10（20/35）kV/0.59（1.18）kV变压器、直流设备、27.5（2×27.5）kV设备及其他设备	110（220/330）kV设备、110（220/330）kV/（27.5/2×27.5）kV变压器、110（220/330）kV/10（20/31.5）kV变压器、10（20/35）kV/（0.59/1.18）kV变压器、直流设备和27.5（2×27.5）kV设备
所内费用	较小	最小	最大
优点	在27.5 kV电源没有引入条件下，投资较小	变电所占地小，投资小，结构简单	电源可靠性高，承担负荷能力强，重负荷对电网影响相对较小
缺点	27.5 kV负荷投入后，对线路容量和短路容量影响较大，通常需要配置三相变单相变压器进行补偿	需要附近有27.5（2×27.5）kV电源，且具备引入条件	设备复杂、占地大及投资高
适用情况	适用于附近没有27.5（2×27.5）kV电源，普速铁路、城际铁路、试车线、调试线和专用线等牵引负荷不大的情况	适用于附近有27.5（2×27.5）kV电源，且具备引入条件	适用于高速、重载等重牵引负荷的情况

波器的三相变单相装置，补偿效果更好。三相变单相变压器的设置要综合考虑线路负荷情况、进线短路容量、IGBT技术发展和投资费用等，以满足电能指标为目标，确定是否需要补偿，采用何种补偿。

6　结束语

双流制牵引变电所接线形式应根据机车负荷情况、外电源情况和项目建设条件等综合确定。

双流制牵引变电所在一个所内同时实现直流和交流馈线的输出，可以同时为轨道交通和电气化铁道的直流线路和交流线路供电，在资源综合利用、资源节约和满足不同制式要求等方面都具有重要意义。

参考文献

[1] ARAI K. Balancing circuit for single phase load with scalene Scott connection transformer[J]. Research Information of Railway Technology, 1980, 37(6): 23-28.

[2] 李群湛. 同相供电系统的对称补偿[J]. 铁道学报, 1991, (增刊1): 35-43.

[3] 李群湛. 电气化铁道并联综合补偿及其应用[M]. 北京：中国铁道出版社, 1993.

[4] 贺建闽，张雪. 同相供电对称补偿技术应用[J]. 铁道学报, 1995, (增刊1): 37-41.

[5] 李群湛，贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化, 1996(4): 9-11, 28.

[6] 吴命利，李群湛. 同相供电对称补偿的接线形式与补偿装置容量选择[J]. 机车电传动, 2000(5): 17-20.

作者简介

周　娟

周娟（1980－），女，高级工程师，主要研究方向为铁道电气化。

(收稿日期：2020－04－15)EA