城市轨道交通无功功率协同补偿方案研究

Research on cooperative scheme for reactive power compensation in Urban Rail Transit

李启峰

Qifeng Li

上海市隧道工程轨道交通设计研究院 上海 200235

Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design & Research Institute Shanghai 200235

摘要:本文首先介绍了城市轨道交通供电系统无功功率补偿的必要性,然后分析了无功功率的分布特性和补偿措施,最后根据城市轨道交通电气设备配置现状提出一种利用中压能馈装置、低压有源滤波装置协同 SVG 进行无功补偿的方案,为供电设备优化配置提供了新思路。

Abstract: Firstly, this paper introduces the necessity of reactive power compensation in urban rail transit, and then analyzes the distribution characteristic and compensation scheme. Finally, the paper puts forward a cooperative scheme, which can provide a new advice for the optimal allocation of power supply equipment.

关键词:城市轨道交通;无功功率;协同补偿

Keywords: urban rail transit; reactive power; cooperative compensation

DOI: 10.36012/etr.v2i12.3071

1.无功功率补偿的意义

目前国内大多数城市轨道交通供电系统采用 110/35kV 两级电压制式、集中供电方式。电能输送过程中 110kV 及 35kV 电缆对地分布电容效应显著,会产生大量的容性无功功率。正常运营时段,城市轨道交通各类感性无功功率所占比重较大,可中和电缆产生的容性无功,系统功率因数较高。而夜间停运时,大量感性负荷退出运行,电缆产生的容性无功所占比例突出,导致容性无功功率倒送,降低系统功率因数,由此会受到供电部门的罚款。另外,容性无功过多还会带来电网电压不稳定、有功损耗增大等问题。因此,对供电系统进行无功补偿十分必要。

2.无功功率分布特性及计算

城市轨道交通主变电所通过 110kV 电缆或架空线从上级变电站获得电源,经 110/35kV 变压器降压,通过中压 35kV 环网电缆将电能分配至各牵引降压变电所。供电网络结构如图 1 所示。

图 1 典型城市轨道交通供电系统图

为便于分析计算,根据城市轨道交通供电系统特点及各类电气设备、电缆阻抗特性,建立供电系统等效电路,如图 2。

图 2 城市轨道交通供电系统等效电路

Y_{12} 、 Y_{34} 、 B_{34} 、和 B_{12} 分别表示电缆导纳和对地电纳。

【作者简介】李启峰(1989~)男,汉族,山东滕州人,研究生,工程师,研究方向:城市轨道交通供电。

Y_z 为主变压器的导纳。

$S=P+jQ$ 为牵引和动力照明负荷。

110kV、35kV 电缆产生的充电无功功率为： $QC=-(U^2_1B_{12}+U^2_3B_{23})$ 。电缆产生的感性无功功率为： $Q_L=X_{112}I^2_1+X_{134}I^2_3$ 。通常 $Q_C \gg Q_L$ ，故可以省略 Q_L 。

变压器的无功功率损耗为： $Q=\frac{i_0\%}{100}S+\frac{U_k\%}{100}S\beta^2$ ，其中

$i_0\%$ 为空载电流百分数； $U_k\%$ 为变压器短路电压百分数； S 为变压器额定容量； β 为变压器负载率。

3. 无功补偿装置分析

供电系统常用的无功补偿装置有电抗器、电容器、静止无功补偿器 SVC、静止无功发生器 SVG 等，实际应用中根据需求各类装置可灵活组合。

电抗器、电容器无功补偿量固定，不能跟踪负荷变化调节补偿，存在无功倒送的情况，但投资少，维护方便。

SVC 补偿装置通过控制可控硅的导通角选择投切电抗器或电容器。响应速度快、可连续调节。但谐波含量大、节能效果差。

SVG 装置可实时监测负载无功变化，通过 IGBT 触发控制策略实现快速、连续自动跟踪补偿，提高实时功率因数。不存在谐振现象，安全性较高，但 IGBT 元件需进口，价格高，且发热量较大^[1]。

随着技术进步及产品不断升级，低压有源滤波装置、中压再生能馈装置也可辅助无功补偿。

低压有源滤波装置可通过控制 IGBT 的触发，向系统中返送超前或滞后的无功电流，实现动态无功补偿。装置主要由补偿主回路、指令电流运算电路、驱动电路、电流跟踪控制电路、电源系统等组成，系统结构如图 3。由于装置容量较小，无功补偿能力有限。

图 3 低压有源滤波装置原理

中压再生能馈装置拓扑结构、开关频率与 SVG 基本一致，可通过改变控制策略，调节输出交流电压的幅值和相位，向电源侧发出无功功率^[2]，其主要接线如图 4。装置由多个功率单元组成，各功率单元的电路原理如图 5。

图 4 中压再生能馈装置主接线图

图 5 再生能馈装置功率单元模块电路原理

4. 协同补偿方案

目前国内大多数城市轨道交通通常在主变电所集中无功补偿。但集中补偿方案设备选型容量大、占地面积大、投资高。在中压再生能馈装置、低压有源滤波装置大量应用于城市轨道交通工程背景下，充分挖掘这两种设备的无功补偿能力，辅助进行系统补偿，不仅降低主所集中补偿安装容量，

还能提高系统配置可靠性、灵活性。

因此,本文从优化设备配置、提高设备利用率和供电质量、减少投资角度考虑,提出一种分布式协同无功补偿方案。

4.1 协同补偿条件

为实现协同补偿,各装置和电力监控系统需具备以下条件:(1)SVG、中压能馈装置、低压有源滤波装置应具有与变电所综合自动化通信的功能,并具有远动调节无功补偿目标值的能力。(2)控制中心电力调度工作站应具备无功功率调度管理功能,可通过主变电所电能质量监测点确定所需无功补偿总量;根据 SVG、中压能馈装置、低压有源滤波装置配置情况,向各装置下达分配无功补偿量。

4.2 协同补偿策略

根据城市轨道交通运营模式及设备功能特点,分布式协同补偿方案分正常运营、夜间停运两种情况。

(1)正常运营模式下,系统中运行着大量感性负荷,容性无功和感性无功可实现内部平衡,需补偿的容量较小。此时,仅 SVG 投入执行补偿功能,低压有源滤波装置执行滤波功能,中压能馈装置执行逆变回馈功能。

(2)夜间停运模式下,容性无功所占比例较大,会导致容性无功功率倒送。此时,需要电力调度系统计算、判断,向 SVG、低压有源滤波装置、中压能馈装置分配补偿任务,补偿设备接收指令调整控制策略执行补偿任务。具体协同补偿策略流程及电力调度系统图分别如图 6、图 7 所示。

5. 总结

为满足电网对城市轨道交通用电功率因素的要求,本文提出一种利用中压能馈装置、有源滤波装置协同 SVG 进行无功补偿的方案。该方案可降低 SVG 安装容量,提高设备利用率,为城市轨道交通供电设备优化配置提供了新思路。

图 6 协同补偿策略流程

图 7 协同补偿电力调度系统图

参考文献

- [1] 王勇.多功能一体化地铁牵引供电系统谐波及无功补偿技术研究[D].北京交通大学,2019.
- [2] 张凯、刘炜、谢文君等.基于逆变回馈装置的城市轨道交通分布式无功补偿方案研究[J].电工电能新技术,2012.
- [3] 桑福环、张海龙、王林等.地铁能量回馈装置的无功补偿控制策略[J].城市轨道交通研究,2016.
- [4] 程晋然、马天文、杨振宇、朱丽娇.地铁再生能馈装置辅助无功补偿的可行性研究[J].电气技术,2019.