

地铁变电所配电变压器能耗分析与研究

孙海东¹ 韩博衍¹ 杨超²

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司)

摘要：本文旨在全面而深入地探讨并分析地铁变电所中不同容量及规格型号的配电变压器对整体能耗水平产生的具体影响及潜在作用机制。通过系统地研究，期望能够揭示不同配置下的配电变压器对地铁系统的具体能效影响表现，从而为优化地铁变电所设计、提升能源利用效率提供科学依据和理论支持。

关键词：地铁；变电所；配电变压器；能耗

0 引言

我国城市轨道交通的发展历程，从初始的空白状态逐步壮大至现今的强健态势，这一进程构成了新中国成立以来城市轨道交通领域的一项标志性成就。在此发展过程中，地铁变电所中的配电变压器在地铁系统中占据了举足轻重的地位。在地铁变电所内部，配电变压器承担着将高压电能有效转换为地铁照明系统、通风设施及信号控制等所需低压电能的关键任务。此转换环节构成了地铁电力系统中不可或缺的一部分，直接关联着地铁系统的顺畅运作。配电变压器通过其精确的转换功能，确保了地铁各个子系统能够获得稳定且可靠的电力供应，进而全面满足地铁运营的各项需求。值得注意的是，城市轨道交通系统作为一个关键的用电领域，按照相关标准，其负荷等级应被界定为一级，其能源消耗及排放问题因此受到社会各界的广泛关注。在地铁变电所中，配电变压器

的合理应用能够显著降低其自身电力损耗，提升能源利用效率，进而有效减少地铁系统的碳排放量及环境污染程度。为积极响应中共中央、国务院发布的关于完整、准确、全面贯彻新发展理念，切实做好碳达峰、碳中和工作的指导意见，本研究致力于通过科学合理的配电变压器选择与配置策略，进一步优化地铁系统的电能利用效率，并显著降低系统运行过程中产生的非必要电能损耗。此举旨在推动城市轨道交通系统向更加绿色、可持续的发展模式转型，对促进整个交通行业的节能减排、实现环境友好型发展目标具有深远且重要的意义。

1 配电变压器损耗概述

变压器的损耗主要来源于两个方面，一是空载损耗、二是负载损耗。空载损耗是指当用额定电压施加于变压器的一个绕组上，而其余的绕组均为开路时，

变压器所吸收的有功功率。负载损耗是指当变压器以额定电流通过其绕组时，由于绕组电阻的存在而产生的损耗。其中空载损耗发生在变压器的铁心中，因此也被称为铁损。负载损耗主要发生在变压器的绕组中，因此也被称为铜损。

2 地铁系统常用的配电变压器

(1) SCB10 系列变压器

采用环氧树脂浇注工艺，使变压器具有防潮、防尘、防污等特性，适用于各种恶劣环境。

线圈采用优质铜材，有效降低损耗，提高能效。

(2) SCB12 系列变压器

与 SCB10 系列类似，也采用环氧树脂浇注工艺，具有防潮、防尘、防污等特性。

线圈和铁心的材料选择更加优化，进一步降低损耗，提高能效。

3 配电变压器的能耗分析

研究原理阐述：本研究旨在通过对比分析两个车站所采用的不同容量配电变压器的运行数据，具体方法包括统计并记录这两个站在连续一年内的总用电量，通过结合车站 35kV 配电变馈线侧和 0.4kV 进线侧多功能表计统计数据，计算得到配电变压器自身电能损耗量。基于此数据基础，深入探究配电变压器容量变化对于能源节约效果的具体影响。

本研究选取海晏北路站（配电变压器容量为 1000kVA）与南高教园区站（配电变压器容量为 1250kVA）作为研究对象，通过连续数月对这两个站点配电变压器的损耗进行精确记录与测量。海晏北路站和南高教园区站 35kV 配电变压器馈线柜和 0.4kV 进线柜均设有多功能表计，通过折算 35kV 配电变压器馈线柜表计与 0.4kV 进线柜表计差值作为配电变压器自身损耗值。海晏北路站和南高教园区站配电变

器电能相关数据如图 1、图 2 所示。

海晏北路站 (配电变: 1000kVA)						
	2022.01		2022.02		2022.03	
	I段	II段	I段	II段	I段	II段
35kV配电变	53996.25	41343.75	42420	32943.75	46410	35306.25
400V进线	51413.2	38988.6	40213	30924.5	44003.3	33112.3
变压器损耗	2583.05	2355.15	2207	2019.25	2406.7	2193.95
平均每天变压器损耗	83.32	75.97	78.82	72.12	77.64	70.77
	2022.04		2022.05		2022.06	
	I段	II段	I段	II段	I段	II段
35kV配电变	47827.5	33600	61897.5	42708.75	88331.25	67646.25
400V进线	45537.4	31546.7	59311	40377.7	85384.3	65172.9
变压器损耗	2290.1	2053.3	2586.5	2331.05	2946.95	2473.35
平均每天变压器损耗	76.34	68.44	83.44	75.20	98.23	82.45
	2022.07		2022.08		2022.09	
	I段	II段	I段	II段	I段	II段
35kV配电变	79458.75	101535	79931.25	82005	58721.25	42866.25
400V进线	76503.8	98425.4	76980.6	79158	55859.6	40538.8
变压器损耗	2954.95	3109.6	2950.65	2847	2861.65	2327.45
平均每天变压器损耗	95.32	100.31	95.18	91.84	95.39	77.58
	2022.10		2022.11		2022.12	
	I段	II段	I段	II段	I段	II段
35kV配电变	59640	37668.75	48930	31736.25	51712.5	32497.5
400V进线	57016.21	35384.9	46505.7	29631.4	49160.8	30011.7
变压器损耗	2623.79	2283.85	2424.3	2104.85	2551.7	2485.8
平均每天变压器损耗	84.64	73.67	80.81	70.16	82.31	80.19

图 1 海晏北路站数据统计

南高教园区站 (配电变: 1250kVA)						
	2022.01		2022.02		2022.03	
	I段	II段	I段	II段	I段	II段
35kV配电变	78828.75	46016.5	69615	37852.5	74865	44625
400V进线	75205	42811.8	66487.2	35086.2	71412.6	41616.9
变压器损耗 (kWh)	3623.75	3204.7	3127.8	2766.3	3452.4	3008.1
平均每天变压器损耗 (kWh)	116.90	103.38	111.71	98.80	111.37	97.04
	2022.04		2022.05		2022.06	
	I段	II段	I段	II段	I段	II段
35kV配电变	70113.75	45412.5	77227.5	55755	97833.75	81585
400V进线	67132.8	42302.2	73745.9	52486.9	94132.71	78096.2
变压器损耗 (kWh)	2980.95	3110.3	3481.6	3268.1	3701.04	3488.8
平均每天变压器损耗 (kWh)	99.36	103.68	112.31	105.42	123.37	116.29
	2022.07		2022.08		2022.09	
	I段	II段	I段	II段	I段	II段
35kV配电变	111011.3	101587.5	105472.5	87333.75	78198.75	48090
400V进线	107036.4	97699	101603.1	83762.2	74731.3	44960.71
变压器损耗 (kWh)	3974.85	3888.5	3869.4	3571.55	3467.45	3129.29
平均每天变压器损耗 (kWh)	128.22	125.44	124.82	115.21	115.58	104.31
	2022.10		2022.11		2022.12	
	I段	II段	I段	II段	I段	II段
35kV配电变	74576.25	53917.5	62370	47145	67725	43417.5
400V进线	71114.6	50733.5	59116.5	44071.6	64299.7	40142.8
变压器损耗 (kWh)	3461.65	3184	3253.5	3073.4	3425.3	3274.7
平均每天变压器损耗 (kWh)	111.67	102.71	108.45	102.45	110.49	105.64

图 2 南高教园区站数据统计

通过观察图表信息，可以清晰地认识到所统计的数据呈现出复杂且多样的特征。鉴于此，利用数据折线图这一可视化手段，能够更为直观且有效地揭示出数据之间存在的差异性，为数据的深入分析提供有力支持。

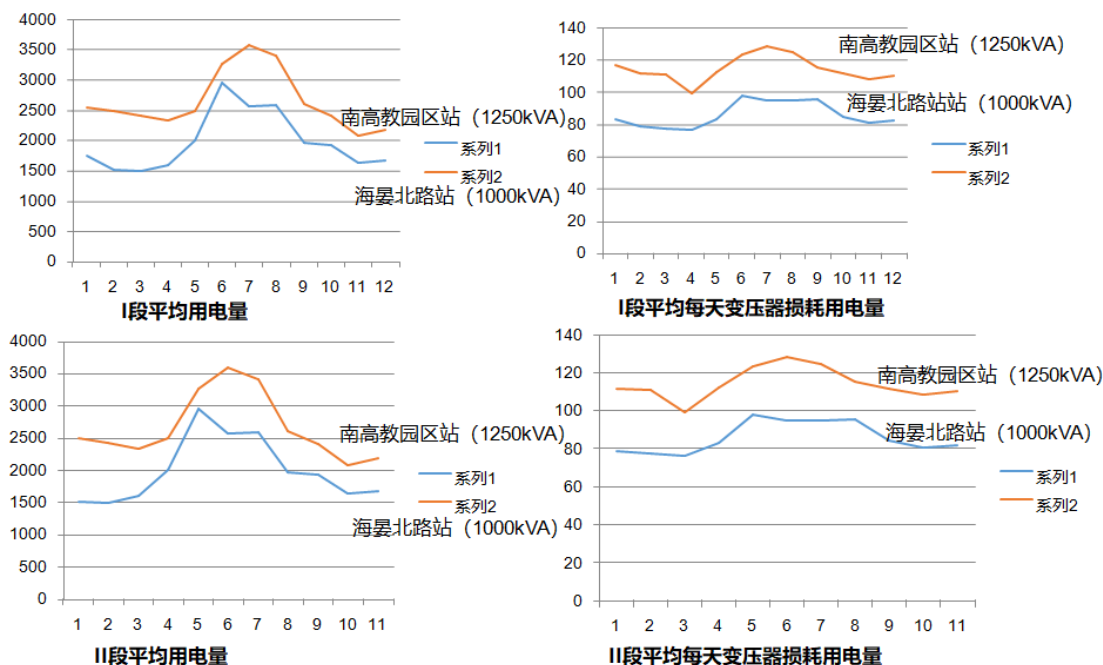


图3 两变电站月用电量及日均损耗量折线图

结合折线图, 可知南高教园区站 (1250kVA) 配电变压器每天损耗比海晏北路站 (1000kVA) 配电变压器损耗高 20kWh 左右。

海晏北路站和南高教园区站配电变压器均采用 SCB10 系列配电变压器。城市轨道交通在列车运营期间, 车站内用电负荷均处于运行状态, 此阶段, 车站用电功率比较高, 在列车停运后, 车站绝大多数负荷均退出运行。

配电变压器每天空载损耗电能为:

$$A = T_1 \times P_0 \quad (1)$$

式中, A 为配电变压器每天空载损耗电能; T_1 为配电变压器每天投入运行时间; P_0 为配电变压器空载损耗。

对于海晏北路站变电所配电变压器而言:

式 (1) 中, T_1 为 24h, 空载损耗 P_0 结合厂家提供数值为 2.29kW, 结合公式计算可得, 海晏北路站变压器平均每天空载损耗电能为 55kWh。

对于南高教园区站变电所配电变压器而言:

式 (1) 中, T_1 为 24h, 空载损耗 P_0 结合厂家提供数值为 2.85kW, 结合公式计算可得, 南高教园区站变压器平均每天空载损耗电能为 68.4kWh。

配电变压器每天负载损耗电能为:

$$B = T_0 \times \beta_1^2 \times P_f + T_c \times \beta_2^2 \times P_f \quad (2)$$

式中, B 为配电变压器每天负载损耗电能; T_0 为车站每天开放运营时间; T_c 为车站每天关停时间; β_1 为车站开放运营时间内变压器负载率; β_2 为车站关停停运时间内变压器负载率; P_f 为配电变压器负载损耗。

对于海晏北路站变电所配电变压器而言:

式 (2) 中, T_0 为 18h, β_1 为 15%, T_c 为 6h, β_2 为 4%, P_f 为 10.2kW, 结合公式计算可得, 海晏北路站配电变压器平均每天负载损耗电能为 4.23kWh。

对于南高教园区站变电所配电变压器而言:

式 (2) 中, T_0 为 18h, β_1 为 20%, T_c 为 6h, β_2 为 5%, P_f 为 12.6kWh, 结合公式计算可得, 南高教园区站配电变压器平均每天负载损耗电能为 9.26kWh。

结合上述计算结果，海晏北路站配电变压器平均每天空载损耗电量和日均负载损耗电能为 55kWh 和 4.23kWh。南高教园区站配电变压器平均每天空载损耗电量和日均负载损耗电能为 68.4 kWh 和 9.26kWh。

南高教园区站单台配电变压器平均每天空载损耗比海晏北路站高 13.4kWh，平均每天负载损耗比海晏北路站高 5kWh，合计南高教园区站单台配电变压器平均每天总损耗电能比海晏北路站高 18.4kWh，考虑还存在部分线路损耗，其理论计算值与现场实测数据基本吻合。

如果将南高教园区站配电变压器容量由原来的 1250kWh 调整为 1000kWh，车站开放运营时间内变压器负载率由原 20% 上升为 25%，车站关停停运时间内变压器负载率由原 5% 上升为 6.25%，结合式（1），其空载损耗将降为 55kWh，较原空载损耗下降 13.4kWh。结合式（2），其负载损耗将上升为 11.7kWh，较原负载损耗上升 2.44kWh，其整体综合电能损耗降低 10.96kWh，其单台配电变压器全年可节约 4000kWh，按照宁波市轨道交通 0.75 元 /kWh 计算，其每年可节约电费 3000 元。

根据城市轨道交通运行特性，夏天 7、8 月份时，地铁车站内空调负荷用电量明显增大，为全年用电负荷最高值。结合上述现场调研数据，南高教园区站变电所配电变压器在 7、8 月份最高瞬时负载率也仅为 24%，若将其容量调整为 1000kVA，其最高负载率也仅为 30%。根据现场调研，南高教园区站用电负荷基本全部投入使用，后续增加用电负荷可能性较小。按照城市轨道交通设计要求，其单台变压器应满足全部车站一二级负荷用电需求。按照现有最高负载率 24% 计算，整座车站 2 台配合变压器合计用电负荷最高为 600kVA。对于城市轨道交通而言，一般车站三级负荷占比为 30%，其一二级用电负荷最高约为 420kVA，考虑在单台变压器退出，另一台配

电变压器带全部一二级负荷时，在将配电变压器容量由 1250kVA 调整为 1000kVA 时，其负载率也仅为 42%，完全可以满足用电需求。综上，对于南高教园区站变电所配电变压器而言，将其由 1250kVA 调整为 1000kVA 可满足车站任何阶段用电需求。因此，将南高教园区站配电变压器容量由 1250kVA 调整为 1000kVA 可满足车站任何工况下的用电需求，在降低设备投资的同时，可降低配电变压器自身电能损耗，减少电费投入。

4 节能型配电变压器

结合现阶段工程实际，《城市轨道交通机电设备节能要求》（GB/T 35553—2017）和《干式电力变压器技术参数和要求》（GB/T 10228—2023）对配电变压器相关技术参数做了要求，主要技术参数详见表 1。

表 1 配电变压器不同规范主要技术参数表

变压器容量 /kVA	GB/T 35553—2017 对参数的设定			GB/T 10228—2023 对参数的设定		
	空载损耗 /kW	负载损耗 /kW	短路阻抗 /%	空载损耗 /kW	负载损耗 /kW	短路阻抗 /%
400	1.09	5.41	4	1.23	5.41	6
800	1.72	9.12	6	1.94	9.12	6
1000	1.94	10.4	6	2.18	10.4	6
1250	2.26	12.7	6	2.54	12.7	6
1600	2.59	15.4	6	2.91	15.4	6

结合《城市轨道交通机电设备节能要求》（GB/T 35553—2017）和《干式电力变压器技术参数和要求》（GB/T 10228—2023）要求，配变变压器应采用 SCB12 系列，SCB12 系列较 SCB10 系列空载损耗降低约 20%。

根据现场实际调研，宁波市轨道交通 5 号线一期选用了 SCB10 系列的配电变压器，而 3 号线二期则选用了更为先进的 SCB12 系列配电变压器。

现场选取宁波市轨道交通 5 号线一期海晏北路站，3 号线二期兴海南路站、永茂路站、骆驼桥站进行调研

分析。这四座车站配电变压器容量均为 1000kVA，其中 5 号线一期海晏北路站为 SCB10 系列，3 号线二期兴海南路站、永茂路站、骆驼桥站为 SCB12 系列。通过对其 2024 年表计数据进行调取，分析结果详见表 2。

表 2 配电变压器负载率及损耗汇总表

	海晏北路站		兴海南路站	
	I 段	II 段	I 段	II 段
35kV 馈线	3581	3277	3232	3241
0.4kV 进线	3468.8	3165.2	3139	3149
平均每天变压器损耗	112.2	111.8	93	92
运营期间负载率	17%	15%	15%	15%
	永茂路站		骆驼桥站	
	I 段	II 段	I 段	II 段
35kV 馈线	2749	3924	3386	3217
0.4kV 进线	2660	3829	3294	3125
平均每天变压器损耗	89	95	92	92
运营期间负载率	13%	19%	15%	15%

结合上述分析可知，3 号线兴海南路站平均每天变压器损耗约为 5 号线的海晏北路站的 83%，永茂路站平均每天变压器损耗约为海晏北路站的 82%，骆驼桥站平均每天变压器损耗约为海晏北路站的 82%。鉴于上述四座车站配电变压器容量均为 1000kVA，其负载率基本都在 15% 左右，负载损耗差别不大，主要区别为空载损耗。根据《干式电力变压器技术参数和要求》（GB/T 10228—2023）规定，SCB12 系列空载损耗较 SCB10 系列降低约 20%，与现场实际调研数据基本类似。

综上，采用节能型配电变压器可降低配电变压器空载损耗，降低配电变压器自身损耗电能，更好地达到节能效果。

非晶合金变压器是一种以非晶态金属为铁心材料，具有较高的饱和磁感应强度、低矫顽力、超低损耗、低激磁电流的新型节能环保配电变压器，非晶合

金配电变压器制作过程中将处于熔融状态的高温液体喷洒到转动的冷却辊上，高温液体的温度再进行快速降低，降温速度达到每秒百万度，例如将 1500℃ 的高温液体在千分之一秒降到环境温度，从而生成非晶带材。与轨道交通行业内传统的硅钢片配电变压器原理完全不一致，结合其结构特性，非晶合金配电变压器空载损耗较传统硅钢片 SCB10 系列降低约 70%，具有很明显的低空载损耗特性，可更好地实现配电变压器节能。现阶段，非晶合金配电变压器已广泛应用于国家电网工程。

5 结束语

1) 现阶段，城市轨道交通配电变压器容量选型偏大，配电变压器使用过程中负载率偏大，在设备投资加大的同时增加了变压器自身损耗，以南高教园区站配电变压器为例，若将其容量由 1250kVA 下降到 1000kVA，其单台配电变压器全年可节约 4000kWh，其每年可节约电费 3000 元。

2) 随着城市轨道交通的发展，对于设备选型更为注重，以宁波城市轨道交通 5 号线 SCB12 系列配电变压器和宁波城市轨道交通 3 号线 SCB10 系列配电变压器比选，同一容量的配电变压器在负载率类似的条件下，SCB12 系列配电变压器自身损耗较 SCB10 系列配电变压器降低约 18%，节能效果明显。

3) 非晶合金配电变压器为一种新型配电变压器，其空载损耗降低尤为明显，更为契合城市轨道交通的使用环境，可进一步结合其自身特性研究其在城市轨道交通应用的可行性。

参考文献

[1] JB/T 3837—2016 变压器类产品标准型号编制方

法 [S].

[2] 郭宝娅. 降低配变运行损耗的技术和管理措施[J]. 云南电业, 2015 (1): 45-46.

[3] 李文静. 降低配变运行损耗的策略研究 [J]. 企业技术开发, 2015, 34 (16): 60-61, 85.

[4] 孙海东, 翁建群. 宁波地铁 1 号线供电工程建设管理 [J]. 现代城市轨道交通, 2015 (6): 70-73.

[5] 孙海东. 城市轨道交通机电工程安全质量管理 [J]. 现代城市轨道交通, 2014 (6): 73-77, 88.

[6] 武兰民, 程灵, 邱宁, 等. 配电变压器用非晶合金的研究进展及应用前景 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (12): 10-13, 20.

[7] 王忻, 吉祥雨, 韩博衍, 等. 城市轨道交通低碳节能技术下牵引供电系统仿真分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (10): 79-84.

[8] 周洪伟, 宗炫君, 方向, 等. 变电站能耗分析及节能环保研究 [J]. 价值工程, 2024, 43 (25): 156-158.

[9] 刘铁男, 卢岩, 魏国文, 等. 基于 GB 20052—2020 标准下变压器经济运行的能耗对比分析 [J]. 现代建筑电气, 2022, 13 (1): 14-18.

[10] 李鲲鹏. 地铁车站配电变压器负载率研究 [J]. 企业技术开发, 2015, 34 (23): 95-96.

[11] 薛春蕾. 电力变压器的能耗分析 [J]. 企业技术开发, 2015, 34 (5): 122-123.

(收稿日期: 2024-12-11)