低压配电系统延长供电半径的经济性分析

万洁芸 涂晓凯
中国汽车工业工程有限公司 天津 300113

摘 要 随着工厂规模不断扩大，在电气配电系统中，除变配电所等主要设备的投资占比较大外，电缆投资也占据较高比例。本文基于50 A、63 A、80 A三种典型长延时电流的供电线路进行对比分析，在确保满足末端短路电流的灵敏度校验、保障电气安全的前提下，探讨配电线路过长时，如何通过选择不同形式的断路器，实现更优的投资节省效果。

关键词 短路电流；短路实用法；电缆价格；4+1芯电缆

Economic Analysis of Extending Power Supply Radius in Low-Voltage Distribution Systems

Wan Jie-yun, Tu Xiao-kai
China Automotive Industry Engineering Co., Ltd., Tianjin 300113, China

Abstract With the continuous expansion of factory scales, investment in cabling constitutes a significant proportion of electrical distribution system costs, second only to major equipment such as substations and power distribution rooms. This paper conducts a comparative analysis based on power supply circuits with three typical long-time delay current ratings of 50 A, 63 A, and 80 A. On the premise of ensuring compliance with sensitivity verification requirements for short-circuit current at the terminal end and guaranteeing electrical safety, this study explores how to achieve superior investment savings by selecting different types of circuit breakers in scenarios involving extended distribution line lengths.

Key words Short Circuit Current; Short Circuit Practical Method; Cable Price; 4+1 Core Cable

在大型工业项目的配电设计中，常出现供电回路长（供电半径大）、断路器长延时整定值（如50 A、63 A）相对较小的工况。在此配置下，线路阻抗较大，易导致末端发生单相接地故障时，故障电流显著衰减，可能出现电流值低于断路器瞬动或短延时脱扣整定值的情况，致使保护装置无法可靠动作，无法满足短路保护灵敏度的校验要求。

为确保保护灵敏度，工程上主要有两种解决思路：其一，依据传统做法，增大电缆导体截面以降低线路阻抗，从而提高末端短路电流，使之满足原有断路器的动作值；其二，采用具备电子式脱扣器的断路器，通过灵活调低其瞬动或短延时整定电流值，使之适应线路实际的故障电流水平，而无须更改电缆截面。显然，两种方案在技术可行性、初期投资及长期经济性上均有不同程度的影响[1]。

因此，本文旨在针对这一具体工程问题，通过建立经济性分析模型，定量研究上述两种方案在不同供电距离下的综合造价。研究的核心目标是探寻从“加大电缆截面方案”转向“采用电子脱扣器方案”的经济性临界点，从而为工程设计人员在面临类似长距离、小电流供电场景时，提供清晰的选型决策依据与工程指导。

1 短路电流计算与校验原则

1.1 基本计算前提

1.短路电流周期分量不衰减。一般用电单位的电源引自地区市政大中型电力系统，用电单位的主变压器或者直降型电力变压器的容量远小于地区电力系统的容量，故短路电流可按照远端发电机端的无限大电源容量的网络短路进行计算。

2.仅考虑短路电路各元件的有效电阻。进行短路电流计算时，对短路点出现的电弧电阻、导线连接点、开关设备和电器的接触电阻等可以不计入计算过程[2]。

3.一般不考虑直流分量。当电路电阻较大，短路电流直流分量衰减较快，一般不考虑直流分量。仅当离配电变压器低压侧很近时，例如低压侧20 m以内大截面线路上或低压屏内部发生短路时，才需要考虑直流分量。

4.取导体计算温度为20 ℃。由于电器的载流量随着温度的变化而发生变化，一般情况默认的电力系统运行方式是气温不超过40 ℃，海拔不超过1 000 m，当气温高于40 ℃时，气温每升高1 ℃，额定电流负荷减少1.8%；在短路电流计算时，单位线路长度有效电阻的计算温度不同，在计算三相最大短路电流时，导体计算温度取为20 ℃；在计算单相短路电流时，假设的

计算温度升高，电阻值增大，其值一般为20 ℃时电阻的1.5倍。

5.计量单位。采用有名单位制：电压（V）、电流（kA）、容量（kVA）、阻抗（mΩ）。

6.计算电压的选取。对于220/380 V低压网络，依据GB/T 15544标准计算短路电流时，计算等效电压源cU_n中的电压系数c取值如下：计算最大短路电流（三相短路）时，c_{max}=1.05；计算最小短路电流（单相接地或相间短路，用于灵敏度校验）时，c_{min}=1.00；U_n为系统标称线电压380 V。

7.利用标幺值计算。取基准值S_j=100 MVA；根据当地电力部门提供数据，系统容量为1 920 MVA；由于主变至中压室电路较短，忽略主变至中压室段电抗及20 kV柜内母排电抗。各元件电抗标幺值计算如下。

电力系统的电抗标幺值：

$$X_{s*}=\frac{S_j}{S_s} \quad (1)$$

降压变压器的电抗标幺值：

$$X_{T1*}=\frac{u_k\%}{100}\times\frac{S_j}{S_{rT}} \quad (2)$$

配电变压器的电抗标幺值：

$$X_{T2*}=\frac{u_k\%}{100}\times\frac{S_j}{S_{rT}} \quad (3)$$

线路的电抗标幺值：

$$X_{L1*}=X_{L1}\frac{S_j}{U_j^2} \quad (4)$$

1.2 末端短路电流校验的要求

对于低压断路器，应符合《低压配电设计规范》[3]（GB 50054—2011）的规定：回路末端最小短路电流应不小于断路器瞬时脱扣整定电流的1.3倍。即：

$$I_{kmin}\geq 1.3\times I_{set} \quad (5)$$

式中，I_{kmin}—末端最小短路电流；I_{set}—断路器瞬时脱扣整定电流。

2 供电半径的确定方法

2.1 不同断路器特性对供电半径的影响

热磁式断路器：保护特性固定，瞬动倍数一般为10～12倍额定电流。适用于供电距离较短、短路电流较大的场合。当线路过长时，需增大电缆截面以提高短路电流，满足动作条件。

电子式断路器：保护参数可调，瞬动、短延时倍数可在较大范围内设置。可通过降低其整定值适应长线路的短路电流水平。初次投资较高，但可节省电缆截面与线路投资[4]。

供电半径受线路压降、短路电流、保护灵敏度等多重约束。本文以末端短路电流满足断路器动作为核心约束，推导最大供电距离：

$$L_{max}=\frac{U_0^2}{4\times\rho\times(1.3I_{set})^2\times R_{unit}} \quad (6)$$

式中，L_{max}—最长允许距离；I_{set}—断路器瞬时脱扣整定电流；R_{unit}—全路径电阻。

3 经济性分析

3.1 长延时为50 A回路的分析

对于50 A长延时配电回路，选择热磁式断路器与电子式断路器以及相应的电缆截面积之间的相互关系详见表1与图1。

表1 各种断路器与电缆截面积之间的关系

断路器参考型号	电缆规格	电缆单价（元/m）	最大供电距离（m）	断路器单价（元）
3VA1B100 R50 TM210 F/3P	YJV-5×10	36.47	61	810
3VA1B100 R50 TM210 F/3P	YJV-5×16	56.94	97	810
3VA2M100 R100 ETU320 F/3P	YJV-5×16	56.94	121	2723

通过表1做出对应的曲线图如图1所示。

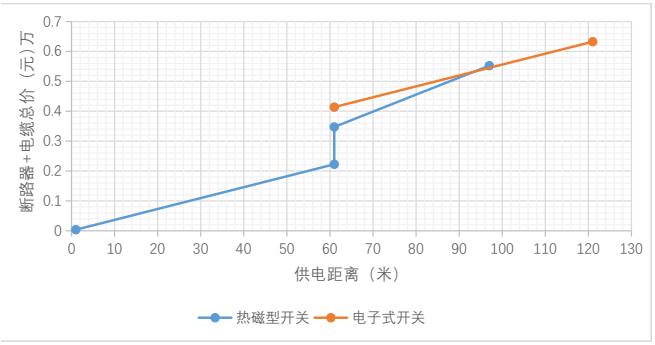


图1 供电距离与总价关系曲线

由上述表格及曲线可知：①当供电距离小于97 m时，选用热磁式断路器以及YJV-5×16电缆的造价低于电子式断路器；②当供电距离超过97 m时，选择电子式断路器，通过将瞬动值整定倍数降低的方式，造价比常规热磁断路器+放大截面积的总投资节省。

3.2 长延时为63 A回路的分析过程

对于63 A长延时配电回路，选择热磁式断路器与电子式断路器以及相应的电缆截面积之间的相互关系详见表2与图2。

表2 各种断路器与电缆截面积之间的关系

断路器参考型号	电缆规格	电缆单价（元/m）	最大供电距离（m）	断路器单价（元）
3VA1B100 R63 TM210 F/3P	YJV-5×16	56.94	97	810
3VA1B100 R63 TM210 F/3P	YJV-4×25+1×16	80.77	118	810
3VA2M100 R100 ETU320 F/3P	YJV-5×16	56.94	154	2723

通过表2做出对应的曲线图如图2所示。

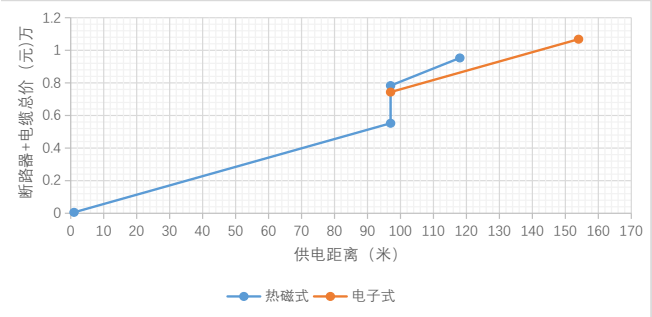


图2 供电距离与总价关系曲线

由上述表格及曲线可知：①当供电距离小于97 m时，选用热磁式断路器以及YJV-4×25+1×16电缆的造价低于电子式断路器；②当供电距离超过97 m时，选择电子式断路器，通过将瞬动值整定倍数降低的方式，造价比常规热磁断路器+放大截面积的总投资节省[5]。

3.3 长延时为80 A回路的分析过程

对于80 A长延时配电回路，选择热磁式断路器与电子式断路器以及相应的电缆截面积之间的相互关系详见表3与图3。

表3 各种断路器与电缆截面积之间的关系

断路器参考型号	电缆规格	电缆单价（元/m）	最大供电距离（m）	断路器单价（元）
3VA1B100 R80 TM210 F/3P	YJV-4×25+1×16	80.77	92	810
3VA1B100 R80 TM210 F/3P	YJV-4×35+1×16	106.14	138	810
3VA2M100 R100 ETU320 F/3P	YJV-4×25+1×16	80.77	148	2723

通过表3做出对应的曲线图如图3所示。

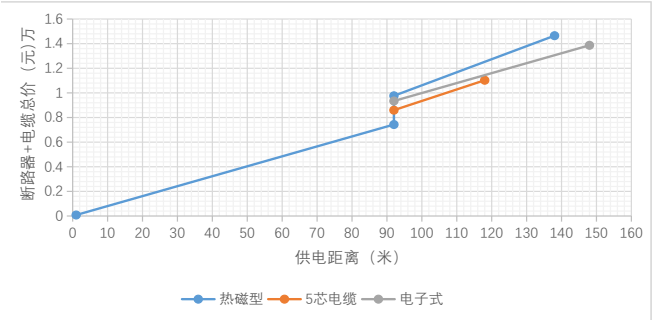


图3 供电距离与总价关系曲线

由上述表格及曲线可知：①当供电距离小于92 m时，选用热磁式断路器以及YJV-4×25+1×16电缆的造价低于电子式断路器；② 当供电距离超过92 m时，选择电子式断路器，通过将瞬动值整定倍数降低的方式，造价比常规热磁断路器+放大截面积的总投资节省[6]。

4 结束语

通过对三种典型回路的分析，可以总结出一个普遍规律：在配电回路中，存在一个明显的“经济性转折距离”。对于50 A、63 A和80 A回路，此经济性优化的距离阈值分别约为97 m、97 m和92 m。

当供电距离超过该值时，选用电子式断路器并合理降低其瞬动整定值，其总体造价比采用常规热磁式断路器并加大电缆截面的方案更为经济。这一发现为工程设计中在长距离供电场景下的设备选型提供了明确的量化依据。

值得强调的是，末端短路电流校验是保障保护可靠性的关键，在任何选型中均不可省略。电子式断路器虽具备整定灵活的优势，但仍必须通过计算验证开关整定值是否满足配电设备正常使用时的冲击电流，以及线路末端的最小短路电流是否大于其瞬动整定值的1.3倍，以确保保护的灵敏度与选择性。

因此，建议在工程设计中采用系统化的优化流程：首先根据负荷与距离初选方案，然后进行严格的短路电流与保护灵敏度校验，最后从全生命周期成本的角度，对比不同方案的经济性与可靠性。电子式断路器较高的初始投资，可能因其精确的保护、更少的停电损失及智能运维的潜力而在长期运营中体现出综合优势。

参考文献

[1]刘屏周.工业与民用供配电设计手册[M].4版.北京:中国电力出版社,2016.

[2]任元会.低压配电设计解析[M].北京:中国电力出版社,2020.

[3]住房和城乡建设部.低压配电设计规范:GB 50054—2011[S].北京:中国计划出版社,2012.

[4]全国建筑物电气装置标准化技术委员会.低压电气装置第5-54部分:电气设备的选择和安装接地配置和保护导体:GB/T 16895.3—2024[S].北京:中国标准出版社,2024.

[5]中国建筑标准设计研究院.低压配电设计与安装:19DX101-1[M].北京:中国计划出版社,2019.

[6]蒲晓成,石银河.断路器作接地故障保护探讨[J].电力设备管理,2023(11):192-194.

（本文编辑 杜宇琪）

