

DOI: 10.7500/AEPS201202173

基于小分段的中压架空线接线模式分析

冯 霜¹, 王主丁¹, 周建其², 张代红², 孙 峰²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆大学, 重庆市 400044;

2. 浙江省电力公司嘉兴电力局, 浙江省嘉兴市 314000)

摘要: 线路分段数量与网架的紧密配合作为提高配电网可靠性手段之一, 可以明显减少用户停电时间。文中在对可靠性与经济参数调研的基础上, 将经济性和可靠性结合在一起, 提出了一种高可靠性分段原则, 继而提出了“小分段”的接线模式。研究表明, 与国内习惯分段数(3~5 段)相比, 线路的分段数量大幅度增加, 3~15 km 的 10 kV 线路最优分段数增加为 4~18 段, 有联络接线模式下系统平均停电持续时间指标从无分段的 3.53~17.63 h 减小到分段后的 0.67~2.19 h, 在保证社会效益的前提下显著提高了供电可靠性。最后, 对影响最优分段数的参数进行了灵敏度分析, 结果表明中压配电线路的最优分段数受到负荷开关单价、线路平均计划停运率、单位停电损失费用及负荷沿馈线分布情况的影响较大。

关键词: 接线模式; 中压架空线; 高可靠性分段原则; 小分段; 投资净收益

0 引言

随着电力企业对供电可靠性量测和管理能力的不断提高, 以及配电网用户对供电质量要求的日趋增强, 电力行业越来越关注和重视供电可靠性。因此, 在电网规划中对供电可靠性指标的研究已成为时下热点^[1]。

提高配电网供电可靠性的主要途径之一是在线路上安装分段开关、联络开关等设备, 以达到隔离故障、减少停电时间的目的^[2]。增加线路的分段数一方面可以提高供电可靠性并减少线路的停电损失, 另一方面也增加了投资, 且线路安装分段开关过多也易造成维护工作量和设备事故率的增加。因此, 有必要寻找一个最佳的线路分段数, 使得可靠性和经济性达到最优平衡。

根据 DL/T 599—1996^[3] 和 Q/GDW 462—2010^[4] 等导则, 中压配电网主要采用环网布置, 开环运行, 线路较长或用户数量较多的中压架空线路一般分为 3 段。文献[5-6]通过综合考虑可靠性成本和缺电成本, 将电网的可靠性指标转化为经济性指标, 在众多分段方案中寻优, 从而使投资净收益达到最佳。文献[7-9]分别采用人工鱼群算法、动态规划算法和改进遗传算法对线路分段开关最优配置数学模型进行求解, 但没有就规划配电网提出一般性的指导建议。当配电网规划阶段的具体线路走向和负荷分布不明确时, 文献[10]采用成本-收益法建立

了一种配电网 10 kV 线路分段数的模型, 但算法仅适用于有联络的线路, 且算例中基础数据不符合实际, 比如“每多供 1 kW·h 电的收益为 0.1 元”。文献[11]针对中压配电网的各种接线模式进行了计算, 得出了供电半径与线路最优分段数的对应关系, 即供电半径越大则最优分段数越多, 但文中没有给出获得计算结果所需要的关键参数。文献[12]采用基于二分法的双层优化规划方法对配电网分段开关数量和安装位置进行优化, 但也没有就规划配电网提出一般性的指导建议。

总之, 现有的分段研究主要有以下几方面的问题: ①基础数据缺乏依据和准确性; ②一般以净收益近似达到最优为目的, 没有将可靠性提升作为优化目标之一; ③没有就分段提出一般性的指导建议。

本文将经济性和可靠性结合在一起, 建立了考虑缺电成本的中压架空线分段优化模型, 在对可靠性与经济参数调研的基础上, 提出了一种高可靠性的分段原则, 继而提出了适合国内电网大规模建设实际的“小分段”接线模式。

1 考虑缺电成本的中压架空线分段优化模型

在基于可靠性的电网规划中, 为综合考虑可靠性与经济性, 将缺电成本加入优化目标函数中, 得到架空线经增加分段后的收益函数为:

$$\max E = (F_{C_0} - F_{C_1}) - (\alpha + \beta + \gamma)nc \quad (1)$$

收稿日期: 2012-02-27; 修回日期: 2012-05-23。

$$\text{s. t. } h(x)=0 \quad (2)$$

$$f(x)\leq 0 \quad (3)$$

式中: E 为线路添加分段开关(断路器或负荷开关)后,电网所获取的投资净收益; F_{C0} 为线路添加分段开关前电网的可靠性停电成本; F_{C1} 为线路添加分段开关后电网的可靠性停电成本; α 为年运行维护率; β 为年资产利润率; γ 为分段开关的年折旧率; n 为添加分段开关的个数; c 为分段开关单价; $h(x)=0$ 为等式约束,如电网节点功率平衡方程; $f(x)\leq 0$ 为不等式约束,如节点电压上下限和设备容量约束,对于基于可靠性的电网规划,不等式约束中还包含可靠性指标下限和投资总额上限约束。

从现有研究情况来看,缺电成本一般通过补偿量和均衡量来估计^[13],而不直接采用供电企业的电价来估计,其估算方法主要有统计法^[6]、市场行为法^[14]和调查估计法^[6,15]等,其中统计法包括国内生产总值(GDP)法、投入产出法和线性规划法等。本文中可靠性停电成本采用 GDP 估算法,即按照单位缺电量减少的 GDP 来计算平均可靠性停电成本 F_C ,可表示为:

$$F_C = C_E E_{\text{LOSS}} \quad (4)$$

式中: C_E 为单位停电量的损失费用; E_{LOSS} 为年电能损失量期望值, $E_{\text{LOSS}} = I_{\text{SAIDI}} P \zeta$,其中, P 为架空线的供电能力, I_{SAIDI} 为系统平均停电持续时间指标, ζ 为负荷率。

值得注意的是,上述 E_{LOSS} 的计算是在负荷均匀分布的条件下进行的,已隐含考虑了用户数。比如总用户数为 H ,每个用户的平均缺电功率为 $p = P/H$,则 $E_{\text{LOSS}} = I_{\text{SAIDI}} \zeta p H = I_{\text{SAIDI}} P \zeta$ 。

本文的收益函数并非仅用于计算投资净收益,还可用于方案优选,即通过比较添加不同数量分段开关后 E 值的差别,从而得到投资净收益最优的分段数。

2 模型求解基础

高可靠性与低投资成本是一对矛盾体,协调解决该矛盾需要确定在何种投资下才能获得供电总成本最低的最佳可靠性水平。

在规划态配电网中,由于网络参数及负荷分布数据不够详细,采用一般用于现状配电网的可靠性评估方法对 I_{SAIDI} 进行精确计算难度较大。文献^[16]提出了一种简化的规划态中压配电网供电可靠性评估模型,并给出了不同简化接线模式线路的 I_{SAIDI} 估算方法。本节在此基础上对仅采用断路器或负荷开关分段的情况提出简化评估公式。

假设断路器两端有隔离刀闸,能够自动切断负荷,具有选择性;负荷开关两端无隔离刀闸,当负荷

开关故障时,通过巡线和倒闸操作后,只有故障负荷开关上游和下游的 2 个小段受影响,其余位置可恢复供电。

设第 i 条主干线的长度为 L_i ,分段数为 N_i ,且各小分段的长度及用户负荷相同;同时仅考虑 $N-1$ 情况。

2.1 分段开关仅为断路器

1)有联络接线模式下的 I_{SAIDI} 为:

$$I_{\text{SAIDI}} = \frac{(1+2+\cdots+N_i)L_i\lambda_1 t_{\text{cd}}}{N_i^2} + \frac{L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{N_i} + \frac{(2+3+\cdots+N_i)\lambda_k t_{\text{cd}}}{N_i} = \frac{(N_i+1)L_i\lambda_1 t_{\text{cd}}}{2N_i} + \frac{L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{N_i} + \frac{(N_i-1)(N_i+2)\lambda_k t_{\text{cd}}}{2N_i} \quad (5)$$

式中: λ_1 为线路故障率; λ_2 为线路计划检修率; λ_k 为断路器故障率; t_1 为线路故障平均修复时间; t_2 为线路计划检修平均修复时间; t_{cd} 为网络重构时间(包括故障巡查时间 t_c 及故障隔离倒闸操作时间 t_d)。

2)辐射式接线模式下的 I_{SAIDI} 为:

$$I_{\text{SAIDI}} = \frac{(1+2+\cdots+N_i)L_i[\lambda_1(t_1+t_c) + \lambda_2 t_2]}{N_i^2} + \frac{(2+3+\cdots+N_i)\lambda_k t_{\text{cd}}}{N_i} + \frac{[1+2+\cdots+(N_i-1)]\lambda_k t_k}{N_i} = \frac{(N_i+1)L_i[\lambda_1(t_1+t_c) + \lambda_2 t_2]}{2N_i} + \frac{(N_i-1)(N_i+2)\lambda_k t_{\text{cd}}}{2N_i} + \frac{(N_i-1)\lambda_k t_k}{2} \quad (6)$$

式中: t_k 为分段开关故障平均修复时间。

2.2 分段开关仅为负荷开关

1)有联络接线模式下的 I_{SAIDI} 为:

$$I_{\text{SAIDI}} = L_i\lambda_1 t_{\text{cd}} + \frac{L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{N_i} + \frac{(N_i-1)\lambda_f t_{\text{cd}} + 2(N_i-1)\lambda_f t_k}{N_i} \quad (7)$$

式中: λ_f 为负荷开关故障率。

2)辐射式接线模式下的 I_{SAIDI} 为:

$$I_{\text{SAIDI}} = L_i\lambda_1 t_{\text{cd}} + \frac{(1+2+\cdots+N_i)L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{N_i^2} + \frac{(N_i-1)\lambda_f t_{\text{cd}} + (2+3+\cdots+N_i)\lambda_f t_k}{N_i} = L_i\lambda_1 t_{\text{cd}} + \frac{(N_i+1)L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{2N_i} + \frac{(N_i-1)\lambda_f t_{\text{cd}} + (N_i-1)(N_i+2)\lambda_f t_k}{2N_i} \quad (8)$$

3 小分段中压馈线接线模式研究

本文中,“小分段”指由断路器界定的各主分段和大分支,再由负荷开关进一步细分为若干小分段,或直接由负荷开关细分为若干小分段,以便在故障和施工检修中进一步缩小停电范围,如图1所示。

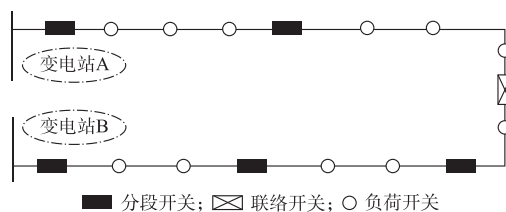


图1 小分段接线模式示意图

Fig.1 Schematic diagram of short segment connection mode

3.1 国外高可靠性接线模式启示

本文借鉴国外高可靠性配电网的特点,特别是日本东京6 kV架空电网。它以3分段4联络模式为主,主干线由馈线自动化系统操作的断路器形成3主分段,各主分段再由负荷开关进一步细分为若干小分段(共13分段),见附录A图A1。主分段可以自动隔离故障,缩小停电范围,而小分段则能在故障修复和计划检修中进一步缩小停电范围。这种接线模式比较适合目前国内电网大规模建设的实际,对网络接线模式的优化有很强的启示作用。

3.2 可靠性与经济参数调研及设定

目前,中压配电网可靠性研究有关文献中的基础数据一般是直接给出或引用其他文献数据,实际应用时可能会使研究结果产生一定偏差。本文结合工程实际应用情况,对部分参数进行了调研和设定,以提高计算结果的准确性。

3.2.1 参数调研

根据国家电力监管委员会可靠性管理中心2010年度公布的数据^[17],农电10 kV架空线的故障停电率为0.047 9次/(km·a),故障修复时间为3.33 h/次;断路器故障率一般在0.07次/(台·a)以内。线路计划停运率与地区经济和负荷水平发展有关,可取0.1~1.0次/(km·a)^[10,16]。

单位停电损失费用在不同地区的差异较大,约为5~15元/(kW·h)。电网负荷率与地区负荷构成和季节性负荷波动有关^[18-19],且负荷率过高,会引起地区缺电等问题^[20],因此,负荷率可取0.35~0.85。

设备的年运行维护率一般取2%~5%^[10],折旧率与开关设备折旧年限(15~20 a)相关,可取5.00%~6.67%。

3.2.2 参数设定及简化假定

基于国内部分区域电网可靠性及经济参数调研结果,本文研究所需参数设定及简化假定如下。

1)断路器有选择性,负荷开关无选择性,其故障率分别为0.05次/(台·a)和0.005次/(台·a),单价分别为3.5万元和1万元;线路故障率和计划停运率分别为0.05次/(km·a)和0.5次/(km·a);电网重构时间和故障(包括线路故障和分段开关故障)修复时间分别为1.5 h和2.0 h。

2)单位停电损失为10元/(kW·h),年维护费率为3.5%,年资产利润率为2.15%,开关年折旧率为6.67%。

3)最大允许电压损耗为10%,线路电阻及电抗分别为0.132 Ω/km和0.378 Ω/km,功率因数取0.9。

4)负荷均匀分布,负荷率为0.65;10 kV辐射式、单联络和多联络架空线路供电能力分别为7.50,3.75,5.60 MW;对于长线路,其供电能力将受最大允许电压损耗影响而下降,比如长度15 km的架空线路其供电能力将变为4.80,3.75,4.80 MW。

5)仅考虑不同长度(线路负荷相同时,线路越长负荷密度越小)的3种典型架空接线主干线(即辐射型、单联络和多联络),不考虑架空支线的影响。

3.3 小分段中压馈线接线模式的研究思路

3.3.1 高可靠性分段原则

当中压线路的分段数较小时,增加分段数可以较明显地提高供电可靠性和投资净收益,但当分段数达到一定数量后,增加分段数的效果会逐渐减弱,甚至带来负效应。鉴于目前仅当投资净收益增加不明显时就停止增加分段的习惯做法,本文提出高可靠性线路增加分段必须同时满足的规则:①增加分段后净收益的增量必须大于0;②增加分段后即便净收益增量很小,但馈线可靠性仍然在持续提升。

3.3.2 分段方案的选取

由可靠性成本/效益曲线分析可知,在线路上安装过多或过少数量的开关均不利于达到可靠性净收益最优。因此,应寻求一个工程上满意的合理分段数量,使投资净收益及可靠性指标达到最佳平衡点。在寻找最优分段的过程中,本文采用以下3种分段方案:方案1,仅采用断路器分段;方案2,仅采用负荷开关小分段;方案3,断路器和负荷开关混合小分段,即先采用2个断路器将线路分为3个主段,再添加负荷开关将各主分段进一步分为若干小段。

3.3.3 最优小分段计算方法和研究思路

小分段中压架空线接线模式研究思路如下。

1)对于方案 1 和方案 2,采用 3.2 节中可靠性指标的简化评估方法和式(1)分别计算 I_{SAIDI} 和投资净收益。

2)对于方案 3,逐渐加入 2 台断路器和 $3k(k$ 为每个主分段中所加负荷开关数)个负荷开关。改用式(9)和式(10)分别计算有联络接线模式和单辐射接线模式下的 I_{SAIDI} ;计算投资净收益仍采用式(1)。

$$I_{SAIDI} = \frac{(1+2+\cdots+R)L_i\lambda_1 t_{cd}}{R^2} + \frac{(1+2+\cdots+M)L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{M^2} + \frac{(2+3+\cdots+R)\lambda_k t_{cd}}{R} + \frac{[1+2+\cdots+(R-1)]\lambda_k t_k}{R} + \frac{(1+2+3)k\lambda_i t_{cd}}{3} + \frac{1}{M}\{[2+3+\cdots+(k+1)] + [(k+3) + (k+4) + \cdots + (2k+2)] + [(2k+4) + (2k+5) + \cdots + (3k+3)]\}\lambda_i t_k = \frac{(R+1)L_i\lambda_1 t_{cd}}{2R} + \frac{(M+1)L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{2M} + \frac{(R-1)(R+2)\lambda_k t_{cd}}{2R} + \frac{(R-1)\lambda_k t_k}{2} + 2k\lambda_i t_{cd} + \frac{(9k^2 + 15k)\lambda_i t_k}{2M}$$

$$I_{SAIDI} = \frac{(1+2+\cdots+R)L_i\lambda_1 t_{cd}}{R^2} + \frac{L_i}{M}(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2) + \frac{(2+3+\cdots+R)\lambda_k t_{cd}}{R} + \frac{(1+2+3)k\lambda_i t_{cd}}{3} + \frac{2 \times 3k}{M}\lambda_i t_k = \frac{(R+1)L_i\lambda_1 t_{cd}}{2R} + \frac{L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{M} + \frac{(R-1)(R+2)\lambda_k t_{cd}}{2R} + 2k\lambda_i t_{cd} + \frac{6k\lambda_i t_k}{M}$$

$$I_{SAIDI} = \frac{(1+2+\cdots+R)L_i\lambda_1 t_{cd}}{R^2} + \frac{(1+2+\cdots+M)L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{M^2} + \frac{(2+3+\cdots+R)\lambda_k t_{cd}}{R} + \frac{[1+2+\cdots+(R-1)]\lambda_k t_k}{R} + \frac{(1+2+3)k\lambda_i t_{cd}}{3} + \frac{1}{M}\{[2+3+\cdots+(k+1)] + [(k+3) + (k+4) + \cdots + (2k+2)] + [(2k+4) + (2k+5) + \cdots + (3k+3)]\}\lambda_i t_k = \frac{(R+1)L_i\lambda_1 t_{cd}}{2R} + \frac{(M+1)L_i(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}{2M} + \frac{(R-1)(R+2)\lambda_k t_{cd}}{2R} + \frac{(R-1)\lambda_k t_k}{2} + 2k\lambda_i t_{cd} + \frac{(9k^2 + 15k)\lambda_i t_k}{2M}$$

式中: R 为不大于 3 的正整数,当 $R < 3$ 时, $k=0$,当 $R=3$ 时, k 取非负整数; M 为附加负荷开关后的总分段数, $M=R+3k$ 。

考虑投资净收益和 I_{SAIDI} ,最后得到最优分段数。

3.4 小分段接线模式计算分析

3.3 节中 3 种方案 10 kV 架空线的最优分段数、最终 I_{SAIDI} 及投资净收益计算结果如表 1 所示。

表 1 10 kV 架空线 3 种分段方案可靠性和经济性对比
Table 1 Comparison of 10 kV overhead line reliability and economy results of three segment scenarios

线路长度/km	接线方式	初始 $I_{SAIDI}/$ (h·(用户·a) ⁻¹)	最优分段数			最终 $I_{SAIDI}/$ (h·(用户·a) ⁻¹)			投资净效益/万元		
			方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
3	辐射式接线	3.45	3	4	6	2.53	2.26	2.34	3.65	5.44	4.20
	多分段单联络接线	3.53	4	8	9	1.13	0.71	0.69	4.53	6.01	5.32
	多分段多联络接线	3.53	5	9	9	1.01	0.67	0.69	7.45	9.41	8.74
5	辐射式接线	5.75	3	6	6	4.06	3.53	3.72	7.38	10.21	8.67
	多分段单联络接线	5.88	5	10	9	1.54	1.01	1.03	8.85	10.75	10.21
	多分段多联络接线	5.88	6	11	12	1.39	0.97	0.89	14.19	16.63	16.16
10	辐射式接线	11.50	5	6	9	7.31	6.99	6.90	18.70	21.38	20.81
	多分段单联络接线	11.75	7	14	15	2.29	1.65	1.43	20.47	23.01	22.80
	多分段多联络接线	11.75	9	16	18	2.01	1.57	1.33	32.02	35.21	35.23
15	辐射式接线	17.25	5	7	9	10.76	10.26	10.21	18.52	21.06	20.37
	多分段单联络接线	17.63	9	17	18	2.83	2.23	1.88	32.63	35.54	35.66
	多分段多联络接线	17.63	10	18	18	2.67	2.19	1.88	42.77	46.07	46.40

由表 1 可见,10 kV 架空线典型接线采用方案 1、方案 2 和方案 3 时的最优分段数范围分别为 3~10,4~18,6~18 段;若架空线为 20 kV 线路,因其供电能力约为 10 kV 线路的一倍,最优分段数也会相应增加,但最优分段数最多不超过 21 段。方案 2 和方案 3 的最终 I_{SAIDI} 和投资净收益明显优于方案 1,且分段数也明显增多。方案 2 和方案 3 的最终 I_{SAIDI} 和投资净收益相当,主要原因在于:①方案 2 仅采用负荷开关分段,开关单价低,投资净收益略好;②方案 3 中断路器具有选择性,能够快速缩短

故障和停运范围,减少用户的停电时间,最终 I_{SAIDI} 略好,还可为将来馈线自动化发展奠定基础;③现阶段影响可靠性的主要原因是计划停电,负荷开关可以胜任。

附录 A 图 A2 用以说明本文提出的基于高可靠性分段原则与习惯分段方法结果的显著差异。图中显示了对长度 10 km 的 10 kV 多分段单联络线路进行分段优化时,3 种方案的投资净收益与 I_{SAIDI} 随分段数增加而变化的趋势。可见,3 种方案在分段数为 6 段时投资净收益增加减缓,但此时 I_{SAIDI} 曲线

仍然下降明显,符合高可靠性分段原则,可继续增加分段。当方案3再增加9个负荷开关后(若再持续增加,投资净收益增量会出现负值),投资净收益只增加6.78%,但 I_{SAIDI} 却减少了42.24%,即63 min,因此方案3的最优分段数最终取为15段。同理,方案1和方案2的最优分段数分别可达7段和14段。比较而言,若采用仅当投资净收益增加不明显时就停止增加分段的习惯做法,最终分段数取6段即可,但其可靠性指标离最佳可靠性水平还相去甚远,难以实现高可靠性目标要求。

4 灵敏度分析

各种接线模式的最优分段数将随着负荷开关单价、线路计划停运率、单位停电损失费用、地区负荷率和其他参数的变化而变化,且不同参数对最优分段数的影响程度也不同。因此,本节对方案3的混合小分段方式进行若干参数的灵敏度分析。

4.1 负荷开关单价的影响

当负荷开关的单价不同时,取多分段单联络接线模式进行分析,结果见附录A表A1。当负荷开关单价为0.5,1.0,2.0万元时,最优分段数范围分别为9~21,9~18,6~12段。可见,随着单价升高,小分段数呈减少趋势。主要原因为负荷开关单价越高则线路分段增加的投资越多,而 I_{SAIDI} 降低获得的投资收益并未变化,使得基于净收益大于0的最优分段数减少。

4.2 线路计划停运率的影响

由于地区实际情况不同,比如施工建设规模、带电作业率高低,导致线路计划停运率不同。因此,应对计划停运率进行灵敏度分析,计算结果见附录A表A2。当线路计划停运率为0.1,0.5,1.0次/(km·a)时,10 kV架空线最优分段数范围分别为2~9,6~18,6~24段(其中最优分段数不大于2段表示只采用断路器分段)。可见,当线路计划停运率较大时,各接线模式的最优分段数明显较多。

4.3 单位停电损失的影响

单位停电损失对线路分段数也会产生影响,根据对单位停电损失的调研,取0.5,5.0,10.0元/(kW·h)进行计算,结果见附录A表A3。单位停电损失为5元/(kW·h)时,分段数较单位停电损失为10元/(kW·h)时有所减小,最优分段数范围在6~15段之间;单位停电损失为0.5元/(kW·h)(仅考虑企业经济效益)时,最优分段数范围在1~6段之间,明显减少。

4.4 负荷率的影响

不同的负荷性质构成导致地区的负荷率会有很

大区别,线路的分段数也受到负荷率的影响。如附录A表A4所示,当负荷率为0.40,0.65,0.80时,10 kV架空线最优分段数范围分别为6~15,6~18,6~21段。根据计算结果可得,当负荷率增加时,尽管投资净收益增加较大,但最优分段数却增加不多。

4.5 其他因素的影响

上文得到的最优分段都有负荷均匀分布的假定,但最优分段数与用户数量、负荷性质和密度、环境等因素有关,应根据实际情况进行适当调整。比如,在负荷密度较大的区域,可能由于配电变压器容量偏大使得配电变压器数量较少,单条线路分段一般不能大于该线路上的总的配电变压器数量(极端情况是只带一个大用户的线路不需要分段)。另外,线路故障率和修复时间(主要涉及设备水平和馈线自动化覆盖率)等参数对架空线最优分段数也将产生影响,本文不再详述。

从以上灵敏度分析结果可见,各项参数对最优分段数均有一定的影响,其中影响较大的因素为负荷开关单价、计划停运率、单位停电损失及负荷沿馈线分布情况,其影响主要是通过改变 I_{SAIDI} 和投资净收益实现的。

5 结论

1)国内相关导则中规定:中压配电网线路较长或用户数量较多的架空线路一般分为3~5段。这在一定程度上限制了当前配电网可靠性水平的进一步提高。

2)本文对可靠性和经济参数进行调研及设定,有利于得到较切合实际的计算结果。

3)本文将经济性和可靠性结合在一起,提出了一种高可靠性分段原则,继而提出了小分段的接线模式。研究表明,一方面与国内习惯分段相比,线路的分段数量大幅度增加,3~15 km的10 kV线路最优分段数增加为4~18段,另一方面在保证社会效益的前提下显著提高了供电可靠性,辐射式接线模式和有联络接线模式的线路 I_{SAIDI} 分别从无分段的3.45~17.63 h和3.53~17.63 h减小到分段后的2.26~10.26 h和0.67~2.19 h。

4)各种接线模式线路的最优分段数随着可靠性和经济参数的变化而变化。不同的参数对最优分段数的影响程度不同,其中负荷开关单价、线路计划停运率、单位停电损失及负荷沿线路分布情况的影响较为明显。

5)高可靠性电网在产生巨大经济效益和社会效益的同时,会给供电企业带来更高的供电成本,需从

政策和电价方面开展深入的研究,便于高可靠性方案的落实^[21]。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] 范明天. 基于可靠性的配电网规划思路和方法: 讲座一 基于可靠性的配电网规划的概况和基本概念[J]. 供用电, 2011, 28(1): 11-14.
FAN Mingtian. Ideas and methods of power distribution network planning based on reliability: Lecture 1 outline and basic conception of power distribution network planning based on reliability[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(1): 11-14.
- [2] 史燕琨, 王东, 孙辉, 等. 基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 136-141.
SHI Yankun, WANG Dong, SUN Hui, et al. Feeder-switches optimal location scheme for comprehensive cost minimization in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 136-141.
- [3] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 599—1996 城市中低压配电网改造技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [4] 国家电网公司. Q/GDW 462—2010 农网建设与改造技术导则[S]. 2010.
- [5] 韦钢, 吴伟力, 张子阳, 等. 综合考虑可靠性成本与缺电成本的电网规划[J]. 继电器, 2006, 34(17): 38-41.
WEI Gang, WU Weili, ZHANG Ziyang, et al. Power network planning considering reliability cost and un-served energy cost[J]. Relay, 2006, 34(17): 38-41.
- [6] 朱旭凯, 刘文颖, 杨以涵. 综合考虑可靠性因素的电网规划新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 51-54.
ZHU Xukai, LIU Wenying, YANG Yihan. A new power network planning method by comprehensively considering system reliability factors[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 51-54.
- [7] 张红霞, 赵秀明, 齐晓娜. 基于人工鱼群算法的配电网开关优化配置研究[J]. 继电器, 2007, 35(17): 27-30.
ZHANG Hongxia, ZHAO Xiuming, QI Xiaona. Switching optimization in distribution networks based on artificial fish swarm algorithm[J]. Relay, 2007, 35(17): 27-30.
- [8] 谢开贵, 刘柏私, 赵渊, 等. 配电网开关优化配置的动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 29-34.
XIE Kaigui, LIU Bosi, ZHAO Yuan, et al. Placement of optimal switching devices in radial electrical distribution networks based on dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 29-34.
- [9] 王峻峰, 谢开贵, 周家启. 配电网开关优化配置的改进遗传算法[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 27-32.
WANG Junfeng, XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi. Improved genetic algorithm for optimal breaking device configuration in medium voltage distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 27-32.
- [10] 康庆平, 卢锦玲, 杨国旺. 确定城市 10 kV 配电网线路最优分段数的一种方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 57-59.
KANG Qingping, LU Jinling, YANG Guowang. A method for optimizing the number of sections of feeder on 10 kV distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 57-59.
- [11] 葛少云, 张国良, 申刚, 等. 中压配电网各种接线模式的最优分段[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 87-91.
GE Shaoyun, ZHANG Guoliang, SHEN Gang, et al. Optimal sectioning of connection modes in medium voltage distribution systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 87-91.
- [12] 葛少云, 李建芳, 张宝贵. 基于二分法的配电网分段开关优化配置[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 41-49.
GE Shaoyun, LI Jianfang, ZHANG Baogui. Optimal configuration of sectional switches in distribution network based on bisection method[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 41-49.
- [13] 曹世光, 杨以涵, 于尔铿. 缺电成本及其估计方法[J]. 电网技术, 1996, 20(11): 72-74.
CAO Shiguang, YANG Yihan, YU Erkeng. Power outage cost and its estimation[J]. Power System Technology, 1996, 20(11): 72-74.
- [14] 孔造杰, 孙龙, 张庆, 等. 基于可靠度的分级电价定价模型研究[J]. 河北工业大学学报, 2003, 32(1): 94-97.
KOGN Zaojie, SUN Long, ZHANG Qing, et al. Study on the grade electrovalence model based on reliability[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2003, 32(1): 94-97.
- [15] 陈俊红, 胡俊祥. 缺电成本及其调查估算方法的探讨[J]. 青海电力, 2006, 25(3): 1-4.
CHEN Junhong, HU Junxiang. Study on the power outage cost and its survey estimation methods[J]. Qinghai Electric Power, 2006, 25(3): 1-4.
- [16] 李历波, 王玉瑾, 王主丁, 等. 规划态中压配网供电可靠性评估模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 84-88.
LI Libo, WANG Yujin, WANG Zhuding, et al. Two reliability evaluation models for medium voltage distribution networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3): 84-88.
- [17] 2010年全国电力可靠性指标[EB/OL]. [2011-05-26]. <http://www.chinaer.org/list.aspx?m=201004241254342501>.
- [18] 钟泽权. 浅析电力负荷构成及对负荷率的影响[J]. 广东电力, 2007, 20(3): 27-30.
ZHONG Zequan. Analyzing electric power load structure and its effect on load factor[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(3): 27-30.
- [19] 朱兆霞, 邹斌. 市场环境下配电公司的风险模型及负荷率的影响分析[J]. 继电器, 2007, 35(12): 56-60.
ZHU Zhaoxia, ZOU Bin. Risk model of distribution utilities and analyzing the infection on the load factor in electricity market[J]. Relay, 2007, 35(12): 56-60.
- [20] 马煜华, 李剑辉. 关于负荷率与供求关系问题的分析[J]. 广东电力, 2005, 18(11): 18-21.
MA Yuhua, LI Jianhui. Analysis on load factor and supply-demand relationship[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(11): 18-21.
- [21] 高山. 关于高可靠性电价实施方案研究[J]. 中国新技术新产品, 2009(23): 198.

冯 霜(1985—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统规划、运行与优化。E-mail: f.s5846@163.com

研究方向:电力系统规划、运行与优化。

周建其(1963—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统规划。

(编辑 万志超)

王主丁(1964—),男,博士,教授,IEEE 高级会员,主要

Medium-voltage Overhead Lines Connection Mode Analysis Based on Short Segment

FENG Shuang¹, WANG Zhuding¹, ZHOU Jianqi², ZHANG Daihong², SUN Feng²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Jiaxing Electric Power Bureau, Zhejiang Power Grid Company, Jiaxing 314000, China)

Abstract: The close coordination between the number of line segments and the grid configuration, as one of the means of improving distribution network reliability, can significantly reduce the power outage time of users. Based on the research on reliability and economy parameters, a kind of high reliability segment rule is proposed with the grid economy and reliability considered together, and then a connection mode of short segments is presented. The result shows that, compared with domestic habitual segments (3 to 5), the number of segments has a substantial increase, so that the optimal segment number of an 10 kV line of 3~15 km is increased to 4 to 18 and the system's average interruption duration index with a tie-connection decreases from 3.53~17.63 h with no segments to 0.67~2.19 h with optimal segments, greatly improving the power supply reliability with the economic benefit guaranteed. Finally, a sensitivity analysis for the segment related parameters is performed. The outcome shows that the optimal segment number of a medium-voltage distribution line is greatly related to the price of a breaker/switch, the average planned outage rate, the energy loss cost and load distribution mode along the feeder.

Key words: connection mode; medium-voltage overhead line; high reliability segment rule; short segment; net investment profit

附录 A



图 A1 东京电网 3 分段 4 联络接线实例

Fig.A1 A real connection mode of 3 segments and 4 ties from Tokyo grid

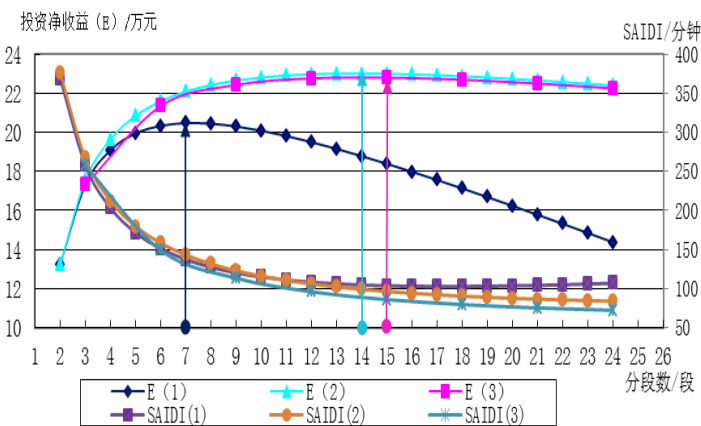


图 A2 10 kV 架空多分段单联络接线 3 种分段方案分段效果变化趋势图

Fig.A2 Multi-segment trend chart for three segment scenarios for a 10 kV overhead line of a single tie-connection

表 A1 10 kV 负荷开关单价灵敏度分析
Table A1 Sensitivity analysis of 10 kV breaker/switch prices

线路长度/km	单价/万元	最优分段数	最终 $I_{SAIDI}/(h \cdot (\text{用户} \cdot a)^{-1})$	投资净效益/万元
3	0.5	9	0.69	5.69
	1	9	0.69	5.32
	2	6	0.85	4.92
5	0.5	12	0.89	10.73
	1	9	1.03	10.21
	2	6	1.32	9.51
10	0.5	18	1.33	23.62
	1	15	1.43	22.80
	2	9	1.89	21.69
15	0.5	21	1.77	36.68
	1	18	1.88	35.66
	2	12	2.31	34.25

表 A2 10 kV 架空线计划停运率灵敏度分析

Table A2 Sensitivity analysis of average planned outage rates for 10kV overhead lines

线路长度/km	接线方式	分段数		
		0.1 次/(km · a)	0.5 次/(km · a)	1 次/(km · a)
3	辐射式接线	2	6	6
	多分段单联络接线	2	9	12
	多分段多联络接线	6	9	12
5	辐射式接线	2	6	9
	多分段单联络接线	6	9	15
	多分段多联络接线	6	12	15
10	辐射式接线	3	9	9
	多分段单联络接线	6	15	18
	多分段多联络接线	9	18	24
15	辐射式接线	3	9	9
	多分段单联络接线	9	18	24
	多分段多联络接线	9	18	24

表 A3 10 kV 架空线单位停电损失灵敏度分析

Table A3 Sensitivity analysis of energy loss cost for 10 kV overhead lines

线路长度/km	接线方式	最优分段数		
		0.5 元/(kW · h)	5 元/(kW · h)	10 元/(kW · h)
3	辐射式接线	1	6	6
	多分段单联络接线	1	6	9
	多分段多联络接线	1	6	9
5	辐射式接线	1	6	6
	多分段单联络接线	1	6	9
	多分段多联络接线	2	9	12
10	辐射式接线	2	6	9
	多分段单联络接线	2	9	15
	多分段多联络接线	2	12	18
15	辐射式接线	2	6	9
	多分段单联络接线	2	12	18
	多分段多联络接线	6	15	18

表 A4 10 kV 架空线负荷率灵敏度分析
Table A4 Sensitivity analysis of load factors for 10 kV overhead lines

线路长度/km		最优分段数		
	接线方式	0.40	0.65	0.80
3	辐射式接线	6	6	6
	多分段单联络接线	6	9	9
	多分段多联络接线	9	9	9
5	辐射式接线	6	6	6
	多分段单联络接线	9	9	12
	多分段多联络接线	9	12	12
10	辐射式接线	6	9	9
	多分段单联络接线	12	15	15
	多分段多联络接线	15	18	18
15	辐射式接线	6	9	9
	多分段单联络接线	15	18	18
	多分段多联络接线	15	18	21