

降低 10 kV 配电网损耗及提高供电质量措施

张 迥¹; 胡晓阳²; 胡建川³; 王主丁²

1. 国网重庆市电力公司长寿分公司, 重庆 401220;
2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;
3. 国网重庆南川区供电有限责任公司, 重庆 408400)

摘要: 电能作为现代社会最依赖的能源, 降低电能损耗、提高电能质量至关重要。10 kV 及以下配电网损耗占整个网络损耗的绝大部分, 具有相当大的降损节能潜力。首先, 介绍了线损产生原因及降低电能损耗、提高电压质量的措施。然后, 对 A 地区现状公用线路进行分析。以某 35 kV 变电站为例, 对其 10 kV 馈线进行了潮流计算分析, 找出电网存在的问题, 并提出相应的具体措施。最后, 采用一种无功电压综合优化方法对变电站多条 10 kV 馈线进行无功补偿计算, 验证了无功规划优化在降损和提高电压质量上的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 电能质量; 降损措施; 潮流分析; 无功补偿

Abstract: It is very important to reduce the electric energy loss and improve the power quality since electric energy is mostly relied on by modern society. The energy loss from 10 kV and below distribution networks accounts for most of the losses from an entire network, which means a distribution network has a great potential of loss reduction and energy saving. Firstly, the reasons of loss and the measures to reduce losses and improve voltage quality are presented. Then, a number of power lines in area A are analyzed. Taking 35 kV substation for example, the load flow of 10 kV feeders is calculated and analyzed, the existing problems of distribution networks are found out, and the corresponding solving measures are put forward. Finally, the feasibility and validity to reduce losses and improve voltage quality are demonstrated by reactive compensation for 10 kV feeders from 35 kV substation.

Key words: distribution network; power quality; loss-reducing measures; load flow analysis; reactive compensation

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0036-06

0 引言

现代社会中, 电能是一种使用最广泛的能源。在全球能源日益紧张的今天, 各国都充分认识到了提高电能质量、降低电能损耗的重要性。

线损率^[1]是反映配电网运行的重要指标, 经常作为对电网企业的考核或同业比对指标。衡量电能质量的主要指标包括电压、频率和波形^[2,3], 其中又以电压质量问题最为普遍。对配电网线损的构成和电压质量进行分析, 制定可行的降损及提高电能质量措施, 并积极加以实施就显得十分必要。目前线损的研究主要集中在理论线损计算方面, 以线损为目标的无功优化、配电网网络重构、补偿电容安装位置的确定等问题。电能质量的研究内容主要包括电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、三相电压不

平衡等, 下面主要对电压偏差方面进行研究。

对配电网线损产生的原因进行分析, 总结出线损主要由电阻、磁场以及管理三个方面导致; 提出降低配电网损耗以及提高电能质量的措施。以某 35 kV 变电站为例, 对其 10 kV 馈线进行了潮流计算, 找出 A 地区电网存在的问题, 并提出相应的具体措施。采用一种无功电压综合优化方法对变电站的多条 10 kV 馈线进行无功补偿计算, 验证了无功规划优化在降损和提高电压质量上的可行性和有效性。

1 线损产生原因及降损措施

1.1 线损产生原因

电力网中线损的产生原因, 归纳起来主要有三个方面的因素, 即电阻作用、磁场作用和管理方面^[4,5]的因素。

(1) 电阻作用

电能 在电网传输过程中, 电流克服电阻的作用引起导体温升和发热, 称为电阻损耗。

(2) 磁场作用

由于磁场的作用, 在电气设备的铁心中产生磁滞和涡流现象, 使铁心产生温升和发热, 称为励磁损耗。

(3) 管理方面的因素

电力企业管理水平落后, 制度不健全, 致使工作中出现的如用户违章用电和窃电; 计量表配备不合理等造成误差损失。

1.2 降损技术措施

(1) 线路经济运行

1) 按经济电流运行, 当线路负荷电流达到经济负荷电流 I_{jj} 时, 线路达到最佳线损率。

经济负荷电流的计算公式^[6]为

$$I_{jj} = \sqrt{(\sum_{i=1}^n \Delta P_{0i}) / 3K^2 R} \quad (1)$$

其中 ΔP_{0i} 为线路上每台变压器的空载损耗 kW; K 为线路负荷曲线形状系数^[1]; R 为线路总等值电阻。

此时的最佳线损率为

$$\Delta A_{sj} = \frac{2K \times 10^{-3}}{U_e \cos \varphi} \sqrt{R \sum_{i=1}^m \Delta P_{0i}} \times 100\% \quad (2)$$

其中 U_e 为线路的额定电压, kV; $\cos \varphi$ 为线路负荷功率因素。

2) 增加并列线路运行^[7]

增加并列线路指由同一电源至同一受电点增加一条或几条线路并列运行。

① 增加等截面、等距离线路并列运行后的降损节电量计算式为

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A (1 - \frac{1}{N}) \quad (3)$$

其中 ΔA 为原来一回线路运行时的损耗电量, kWh; N 为并联运行线路的回路数。

② 在原导线上增加一条不等截面导线, 此时的降损节电量计算式为

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A (1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}) \quad (4)$$

其中 R_1 为原线路导线电阻, Ω ; R_2 为增加线路导线电阻, Ω 。

(2) 变压器经济运行^[7-10]

1) 单台变压器的经济运行

单台变压器运行时, 当空载损耗和负载损耗相

等时, 此时运行效率最高, 最经济, 此时的负载系数为

$$K_F = \sqrt{\Delta P_0 / \Delta P_k} \quad (5)$$

此时变压器的经济负荷为

$$S = K_F \times S_N \quad (6)$$

其中 ΔP_0 为变压器的空载损耗, kW; ΔP_k 为变压器的负载损耗, kW; S_N 为变压器的额定容量, kVA。

2) 多台变压器的经济运行

① 多台同容量

当变电站有多台相同型号的双绕组变压器并列运行时, 应分别计算变压器的临界负荷, 确定不同负荷情况下应当投运的变压器台数。

临界负荷计算式如下。

$$S_C = \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_0}{\Delta P_k F} S_N} \quad (7)$$

其中 n 为并列运行的变压器台数; F 为变电站总负荷的损失因数。

若变电站的总负荷为 S_{max} , 当 $S_{max} > S_C$ 时, n 台并列运行最经济; 反之, 则 $n-1$ 台运行最经济。

② 多台不同容量

当变电站有多台不同型号的双绕组变压器时, 计算列出各种组合方式下的临界负荷表, 然后再根据变电站的负荷选择最经济的组合方式。

每两种组合方式的临界负荷可按式(8)计算。

$$S_{c(ij)} = \sqrt{(\Delta P_{0i} - \Delta P_{0j}) / [\frac{\sum P_{ki}}{(\sum S_{Ni})^2} - \frac{\sum P_{kj}}{(\sum S_{Nj})^2}] / F} \quad (8)$$

其中 $\Delta \sum P_{0i}$ 、 $\Delta \sum P_{0j}$ 为第 i 种及第 j 种组合方式并列变压器组的总空载损耗, kW; $\sum P_{ki}$ 、 $\sum P_{kj}$ 为第 i 种和第 j 种组合方式并列变压器组的总额定短路损耗, kW; $\sum S_{Ni}$ 、 $\sum S_{Nj}$ 为第 i 种和第 j 种组合方式并列变压器组的总额定容量, kVA。

(3) 网络改造

更换配电网中残旧线路、小截面线路可以降低线路损耗; 更换高损耗配电变压器降低配电变压器损耗。

(4) 增加电源点

随着经济的发展和用电负荷的不断增长, 原有 10 kV 配电网的负荷越来越重, 如果维持这种较低电压等级的电网长距离供电的状态, 不但电压质量很难保证, 线损电量也会很大。在负荷较重, 供电线

路过长的地方考虑增加电源布点,能缩短线路供电半径,有效地降低线损。

(5) 无功补偿降损

电力系统中由于动态变化的非线性负荷的存在,引起系统有功和无功的快速变化导致系统电压波动和闪变以及供电电压波形的畸变。如果无功储备不足将会导致电网电压水平降低,这就需要对电网或用户进行无功补偿以提高电压质量,降低系统的损耗。此外,无功补偿也有益于电压质量的提高。

1.3 降损管理措施

(1) 加强电能计量管理

配备合理的计量装置,以使用户或出线用电负荷较小时也能准确计量。

(2) 加强用电营业管理

一要加强防窃电管理;二要加强抄表核收工作的质量管理和工作责任心,建立健全抄表核收工作制度。

(3) 开展线损理论计算工作

通过对配电网线损的定期计算,对每个元件的功率损失和电能损耗加以掌握,并与实际统计所得的线损值比较分析,从而明确损耗的构成情况,积极地采取措施,将线损降至合理水平。

(4) 完善线损管理考核机制

在原有分线分台区线损考核的基础上,结合目前线损发展的新形势,进一步理顺基础资料,强化抄表管理,使分线分台区线损统计更加准确。

2 提高电压质量措施

(1) 适当的调压

常用的调压方法有:利用发电机调压;改变变压器变比调压;并联补偿无功设备调压;串联电容器调压^[11-13];SVR 馈线自动调压。根据电网实际情况,选择合理的调压措施,保证电压质量。

(2) 增加电源点

适当增加电源点,优化电网结构。新建变电站的新出线路可转移现有线路的部分负荷,不仅降低损耗,还能保证电压质量。

(3) 加强电压质量管理

一要加强电压质量的监测管理。实现电压质量系统分析,为提升电压管理和提高电压合格率奠定坚实基础。二要加强线路设备巡视。做到对线路

设备异常情况及时掌握。三要开展电压指标分析,推动配电网低电压台区改造。

3 无功电压综合优化措施

配电网的无功优化可分为规划优化和运行优化。

1) 配电网的无功规划优化,是指在满足系统各种约束(包括功率平衡、电压质量等)的前提下,调节分布式无功电源的功率以及变压器的分接头和变压器分接头等,确定无功补偿装置的最佳装设地点和最优补偿容量,降低网络损耗,改善电压质量。

2) 配电网的无功运行优化,是指在现有无功补偿设备的基础上,根据负荷的变化,通过调节分布式无功电源的出力、电容器组运行投切和变压器分接头等,降低网络损耗并提高电压合格率。无功运行优化需要配电网的自动化配合,通过监测本地的电压以及有功功率、无功功率等来调节变压器的档位以及电容器的开关,从而使电压以及无功功率处于合理的范围内。

这里采用一种无功电压综合优化措施,保证电压质量的同时降低损耗。其基本无功优化程序基于遗传算法、节点优化编号和辐射状配电网特点,采用一种将确定性方法和随机性方法进行有机组合的配电网无功规划优化混合算法。该算法通过综合考虑经济效益和电压约束,提出一种动态确定节点补偿容量上限的有效方法^[14],将其用于初始种群的生成,可自动确定补偿节点总数及各补偿节点补偿组数的上限值。

4 配电网线路分析及潮流计算

4.1 线路分析

A 地区有 110 kV 变电站 2 座,35 kV 变电站 9 座,10 kV 线路 46 条,配电变压器 1 746 台,总容量为 188.85 MVA。

1) 供电半径

46 条 10 kV 公用线路主干长度超过 15 km 的有 14 条,主干超过 10 km 的有 27 条,大部分线路供电半径过长。

2) 配电变压器数量

A 地区 10 kV 公用线路装接配电变压器容量主

要集中在 8 MVA 以内;共有 4 条线路装接配电变压器容量超过了 15 MVA,均为城区线路,负荷较重,所带配电变压器容量大。其余线路装接配电变压器容量较低的主要原因是农村供电线路负荷以居民为主,住户较少,供电区域分散,负荷密度较小,并且现有 10 kV 线路导线截面以 50、70 为主,限制了线路的配电变压器装接容量。

3) 线型分析

A 地区架空线路截面主要为 50 (mm)² 和 70 (mm)²。

《农网建设与改造技术导则》规定^[15]: 县城、城乡结合部和集镇供电区新建与改造 10 kV 线路主干线线径统一为 240 (mm)²,农村区域 10 kV 线路主干线线径不小于 95 (mm)²。A 地区城区现有 10 kV 公用线路主干导线截面小于《导则》要求的共有 6 条,农村地区现有 10 kV 公用线路主干导线截面小于 95 (mm)² 有 30 条,普遍导线截面过小。

4.2 潮流计算

以 A 地区某 35 kV 变电站为算例,对其 10 kV 馈线进行潮流分析。该变电站有 6 条 10 kV 馈线,其基本信息如表 1 所示。

表 1 馈线基本信息

线路名称	主干线型 /mm ²	主干长度 /km	装接配变	
			台数	容量 /kVA
线路 1	LGJ-70	1.573	9	1 515
线路 2	LGJ-95	15.32	64	4 680
线路 3	LGJ-70	28.1	33	3 705
线路 4	LGJ-70	18.506	150	7 210
线路 5	LGJ-50	13.603	33	1 640
线路 6	LGJ-70	9.77	101	5 865

采用美国加州 WLSL 星能电气有限公司和重庆星能电气有限公司开发的《CEES 供电网计算分析辅助决策软件——潮流计算子系统》进行建模和潮流计算,得出各馈线最大负荷电流运行方式下的电压损耗及线损情况,如表 2 和表 3 所示。

表 2 馈线电压损耗情况

线路名称	首端电压 /kV	末端电压 /kV	电压损耗 百分比 /%
线路 1	10.59	10.5	0.85
线路 2	10.59	10	5.57
线路 3	10.58	9.02	14.74
线路 4	10.54	7.42	29.60
线路 5	10.6	9.84	7.17
线路 6	10.57	9.25	12.49

表 3 馈线系统损耗情况

线路名称	线路有功 损耗 /kW	变压器有功 损耗 /kW		总损耗 /kW	损耗率 /%
		铁耗	铜耗		
线路 1	16.21	21.37	26.02	63.6	4.15
线路 2	57.66	11.79	29.6	99.05	6.62
线路 3	166.82	24.96	15.42	207.2	12.91
线路 4	539.63	32.06	24.11	595.8	24.40
线路 5	79.29	22.73	20.78	122.8	10.38
线路 6	148.89	32.58	14.73	196.2	11.07

由表 2 可知,线路 4、线路 3、线路 6 电压损失较严重,电压损失百分比分别为 29.60%、14.74%、12.49%。其中,线路 4 电压损失最为严重,末端电压仅为 7.42 kV。线路 4、线路 3、线路 6、线路 5 有功损耗分别达到 24.4%、12.91%、11.07%、10.38%。

5 存在问题及解决措施

经过对 A 地区电网的 46 条公用线路进行潮流计算,找出存在的线损和电压问题,同时结合 A 地区实际,提出了降损和提高电能质量的综合措施。

5.1 存在主要问题

A 地区配电网主要存在两个问题,一是无功补偿不足。目前 A 地区配电网的无功补偿主要是采用变电站集中补偿方式,配电线出口的功率因数一般能满足要求,但 10 kV 线路的功率因数却较低。为此在当前的情况下,应加强对客户无功补偿装置的管理,使客户无功补偿装置切实发挥作用。二是线路供电半径长,导线截面过小。一、二期农网改造时,因投入改造资金少,为了扩大改造面,导致电网改造的标准低,供电半径长,导线型号小,变压器容量小,变压器布置不合理,供电质量和供电可靠性低,线损高,现已远远不能满足居民用电负荷发展的需要。

5.2 解决措施

(1) 加强无功补偿

A 地区配电网的无功补偿主要是采用变电站集中补偿方式,这对降低配电网线损的效果不明显,应加强低压的无功补偿。通过潮流计算,适当增加低压无功补偿能有效降低线损,提高电压质量和功率因素。

(2) 更换导线、高耗能变压器,降低电阻,降低损耗

部分线路已经超过经济电流密度运行,需要进行改造换线工程,降低损耗。补偿前线损率超过

10%的4条线补偿后仍然有1条线线损率高于10%,即线路4,其线型为LGJ-70,导线截面过小,应将主干线路更换为LGJ-95线型。

(3) 改造不合理台区 降低配电损失

该变电站部分10 kV线路的负荷较大,所带配电变压器过多。在个别地区,低压线路过长且布局不合理。因此,改造不合理的配电变压器台区是很有必要的。同时,注意解决配电变压器过载问题。

(4) 适当增加电源布点 缩短线路供电半径

目前,该变电站有4条线的线路长度都超过了《农网建设与改造导则》要求的15 km。如10 kV线路4供电半径达20 km,总长度达80.94 km。可以考虑在该变电站附近增加电源布点,缩短供电半径,降低线路损耗,提高电压质量。

(5) 加强线损管理和理论线损计算

一要加强抄表的管理,确保实际反应线损;二要定期召开各级线损分析会,对线损率突升、损失电量突增的异常事件进行分析,查明原因,落实降损措施和责任单位;三要做好理论线损计算,认真梳理电网基本资料,分析电网各类元件的损耗情况,根据理论分析结果制定节能降损的技术措施计划。

6 无功规划算例

采用《CEES 供电网计算分析辅助决策软件——无功补偿子系统》进行无功规划优化,确定的部分无功补偿装置的装设地点和补偿容量如表4所示。

表4 无功补偿安装地点和容量

线路名称	无功补偿点	额定电压 /kV	配变容量 /kVA	补偿容量 /kvar
线路3	配变28 低压侧	0.4	630	360
	配变29 低压侧	0.4	500	320
	配变6 低压侧	0.4	100	90
	配变7 低压侧	0.4	80	60
	配变23 低压侧	0.4	100	60
线路5	配变34 低压侧	0.4	80	60
	配变52 低压侧	0.4	80	60
	配变54 低压侧	0.4	80	60
	配变57 低压侧	0.4	80	60
线路6	配变7 低压侧	0.4	315	110
	3支线22号杆	10	-	700

补偿前后的线损及馈线功率因素如表5所示。

表5 补偿前后线损和功率因素对比

线路名称	线损电量 / (MWh · a ⁻¹)		线损率 / %		功率因素	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
线路3	365.7	258.3	11.57	8.46	0.83	0.97
线路5	194.4	155.3	10.38	6.82	0.84	0.97
线路6	341.1	252.2	11.07	7.4	0.83	0.98

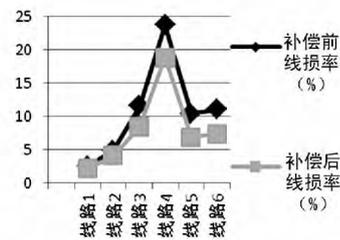


图1 补偿前后的线损率对比

此次无功补偿多在配电变压器低压侧补偿,且大部分在大容量配电变压器的低压处补偿。补偿后电压较低的线路4、线路3、线路6的末端电压分别提高到9.4 kV、9.66 kV和9.59 kV。补偿前线损率超过20%有1条,即线路4,线损率达到23.73%,补偿后线损率降低到18.81%。线损率在10%~20%之间的有3条,分别为线路3、线路6、线路5,线损率分别达到11.57%、11.07%、10.38%,补偿后线损率分别降低到8.46%、7.4%、6.82%。4条线的年总降损收益为26.44万元,节能效果显著。验证了无功补偿规划优化的可行性和有效性,降低了线损,保证了电压质量。

7 结论与展望

(1) 线损方面,措施分为降损技术措施和降损管理措施。技术措施包括线路经济运行、变压器经济运行、网络改造、增加电源点、无功补偿降损;管理措施包括加强电能计量管理、加强用电营业管理、开展线损理论计算工作、完善线损管理考核机制。

(2) 电压质量方面,措施有适当调压(包括SVR调压)、增加电源点、无功补偿、加强电压的监测及指标分析,加强线路设备巡视。

(3) 无功电压综合措施,结合无功规划优化和运行优化,自动确定无功补偿装置的最佳装设地点和最优补偿容量,自动调节有载调压变压器分接头

和控制电容器投切,降低网络损耗,改善电压质量。

(4) 计算结果都是基于 A 地区现状电网计算得到,若适当增加电源点、缩短线路的供电半径和更换小截面导线,降损效果更佳。如线路 5 导线型号为 LGJ-50,若将其更换为 LGJ-95 的导线,损耗将在此基础上再减少 50%,而且电压质量也能得到进一步提高。

(5) 实际算例验证了无功电压规划优化对降损及提高电压质量的有效性。在不久的将来,随着配电网自动化控制的不断推进,通过在配电网全网实现无功电压控制,有利于进一步提高全网电压的合格率,降低电网的损耗。

参考文献

[1] DL/T 686-1999 电力网电能损耗计算导则[S].

[2] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.

[3] 朱桂萍, 王树良. 电能质量控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 28-31.

[4] 廖学琦. 农网线损计算分析与降损措施[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

[5] 盛万兴. 配电系统综合节能技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[6] 周强. 中低压线损计算方法与降损措施的研究[D]. 郑

州: 郑州大学, 2009.

[7] 吴强. 实际配电系统线损分析与降损措施研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.

[8] 刘海峰. 配电变压器经济运行分析[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(5): 48-49.

[9] 郑琳. 配电变压器的经济运行[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(5): 61-62.

[10] 夏春燕. 变压器经济运行分析与应用[J]. 变压器, 2007, 44(12): 24-28.

[11] 江振生. 电力系统调压措施的合理选用[J]. 中国科技信息, 2006(2): 130.

[12] 许一星, 李越冰. 电网电压问题与调整措施[J]. 中国电力教育, 2009(139): 261-262.

[13] 来美英, 来运梅. 电力系统的调压措施[J]. 科技信息, 2006(9): 457.

[14] 赵俊光, 王主丁, 张宗盛, 等. 基于节点补偿容量动态上限的配电网无功规划优化混合算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 69-74.

[15] Q/GDW 462-2010 农网建设与改造技术导则[S].

作者简介:

张 迺(1987), 主要从事管理降损研究;
胡晓阳(1991), 硕士研究生, 主要从事配网降损与无功优化研究。

(收稿日期: 2013-12-24)

(上接第 9 页)

运行稳定可靠,减少了试验人员工作量,提高了供电可靠性和智能化水平,可在电力系统中推广。

参考文献

[1] 朱德恒, 谈克雄. 电绝缘诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[2] 严璋. 油浸电力变压器固体绝缘老化的诊断及其应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.

[3] 尚勇, 钱政, 杨敏中, 等. 高电压设备绝缘老化及状态维修的实现[J]. 高电压技术, 1999, 25(3): 40-42.

[4] 宋伟. 变压器绝缘老化与寿命评估[D]. 济南: 山东大学, 2005.

[5] 申翰林. 基于回复电压法的油浸式变压器状态检测关键技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[6] 朱德恒, 严璋, 谈克雄. 电气设备状态监测与故障诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[7] 王昌长, 李福琪, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[8] C. G 瓦修京斯基, 崔立君, 杜思田, 等译. 变压器的理论与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

[9] Schuert P J, Nevin J H. A Polyimide-based Capacitive Humidity Sensor[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1985, 32(7): 1220-1223.

[10] 王洪亮, 周利军, 吴广宁. 不同含水量对油纸绝缘老化速率影响的研究[C]. 第十届全国工程电介质学术会议论文集, 2005.

[11] 刘敏. 不同含水量对油纸绝缘老化速率的影响[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 40-42.

作者简介:

尧 广(1983), 工学硕士, 工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期: 2013-11-04)