

DOI: 10.7667/PSPC170127

基于两级变压模式的配电电压选择方法

熊小伏¹, 匡仲琴¹, 朱继忠², 欧阳金鑫¹

(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 400030;

2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 针对传统 0.4 kV 低压直配电方式难以兼顾远近距离负荷的节能高效配电需求问题, 提出一种基于两级变压模式的配电电压选择方法。配电变压器采用三绕组变压器结构, 对近距离负荷采用 0.4 kV 直接配电, 对供电半径和容量不满足 10 kV 供电条件的远距离分散负荷采用高于 0.4 kV 的补充电压实施两级变压供电, 来实现降低配电网损耗、保障用户电压质量的目的。以配电网全寿命周期成本与损节约费用作为目标函数, 同时计及可靠性和电能质量约束, 能选择出具有最优综合效益的配电电压和配电模式。

关键词: 两级变压模式; 配电电压; 远距离负荷; 三绕组变压器; 全寿命周期成本

Distribution voltage selection method based on two-stage transformation mode

XIONG Xiaofu¹, KUANG Zhongqin¹, ZHU Jizhong², OUYANG Jinxin¹

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

Chongqing 400030, China; 2. China Southern Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Traditional 0.4 kV direct distribution mode cannot meet the energy conservation and transmission efficiency requirements of both close and distant loads. For this problem, this paper proposes a distribution voltage selection method based on two-stage transformation mode. This method takes three-winding transformer as distribution transformer to output two different voltage levels. The level 0.4 kV delivers power directly to the close loads, while the voltage level higher than 0.4 kV distributes power by two-stage transformation mode to the distant loads that cannot meet the supply radius and capacity requirements of 10 kV. It combines Life Cycle Cost (LCC) with loss reduction benefit as the objective function. With the reliability and power quality constraints, this method can figure out the best distribution mode and the proper distribution voltage.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407017).

Key words: two-stage transformation mode; distribution voltage; distant load; three-winding transformer; life cycle cost (LCC)

0 引言

配电网作为电力系统的重要构成, 是上级电网向用户传输电能的最终环节, 其运行的安全性、可靠性和供电质量对用户有直接影响^[1]。我国中低压公共配电系统的电压等级比较单一, 中压配电网一般采用 10 kV 供电; 低压配电网仅有 0.4 kV 一个电压等级, 一般采用 0.4 kV 直配电方式^[2], 前后两级电压之比可为 25。根据配电设计规范要求, 0.4 kV 线路的供电半径宜小于 400 m, 10 kV 线路的输送理

想距离为 6~20 km^[3]。当用电设备总容量低于 250 kW 或变压器容量低于 160 kVA 时, 不宜采用 10 kV 供电^[4]。因此, 对容量和距离不满足 10 kV 供电要求的较远负荷采用低压直配电方式, 线损往往很大, 电压质量也难以保证。

传统 0.4 kV 直配电方式低压线缆经配变引出直接接至用户, 送电容量小、出线回路多、线行通道拥挤、供电半径有限。特别在农村远郊地区, 负荷小而分散, 供电距离远, 电压质量差。现有的配电方式很难兼顾近距离组团负荷与远距离分散负荷的节能、高效配电需求, 亟待研究突破性的配电技术来解决当前配电方式面临的困境。

目前,我国用于改善中低压配电网损耗和电压质量的方法主要有无功补偿^[5-10]和加装调压装置^[11-15]两种。无功补偿是配电网节能降损和电压质量调节应用最广泛的手段^[5]之一,有集中补偿、就地补偿^[6-7]和分散补充^[8]三种方式。无功补偿最大的优点在于能提高设备传输效率^[9],但不能解决因供电半径、负荷条件和网络自身参数导致的有功损耗。由于无功具有“分级补偿、就地平衡”的特性^[10],无功补偿不能减少补偿点之前线路和设备的损耗。另一方面,安装调压装置也能起到提高传输极限、稳定供电电压的作用^[11],可装设有载调压变压器^[12]和馈线调压器^[13],或在入户前增设稳压调压器。有载调压变压器成本较高,调节不太方便,较少用于中低压配电网中;馈线调压器成本也比较高,调节灵活、适应性好^[14],但调节范围有限;稳压器成本较低,电压质量的改善效果突出,但调节范围也有限(一般不大于 20%)^[15],且不能解决配电线路上的损耗问题。

鉴于当前配电方式和改善手段不能同时解决距离较远负荷因供电半径和供电电压瓶颈造成的线损和电压质量问题,本文提出一种基于两级变压模式的负荷配电方式选择方法,增加一个高于 0.4 kV 低于 10 kV 的补充电压层级 U_m ,通过三绕组变压器中、低压侧输出补充电压 U_m 和直配电压 0.4 kV 向远、近距离负荷分别供电。对距离变压器较远的负荷采用两级变压模式供电,可以有效降低直配方式下的线损,保障远距离用户的电压质量,达到兼顾远、近负荷高效配电需求的目的。

1 基于两级变压模式的配电方式选择

1.1 采用三绕组配电变压器的两级变压模式

农村小城镇存在大量容量小而分散的负荷,这些负荷距离配电变压器较远,具有“星云状”和“卫星式”分布特点。

如图 1 所示,以圆圈表示负荷的位置,圆圈大小表示负荷大小,黑色方框代表配电变压器位置。

“星云状”分布的负荷,配电变压器布置于配电台区内近区负荷密集处,配电变压器周围较远距离处零星分散着很多小容量的负荷;“卫星式”分布的负荷,有少数小容量负荷分布于距离配电变压器较远的位置,孤立于组团负荷中心。这些负荷的供电半径和容量不满足 10 kV 供电条件,但采用常规 0.4 kV 直配电方式,线路过长、损耗较高,末端电压质量较差。随着电能替代和分布式电源的发展,这些分散负荷的容量需求在逐步扩大,输电线路的功率波动性和损耗也在增加,电压质量面临越来越严重的问题。

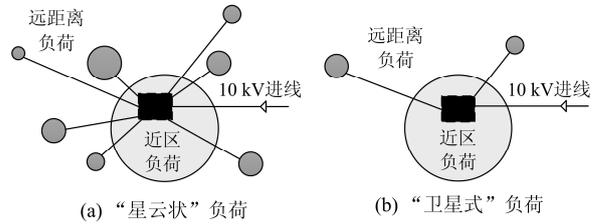


图 1 “星云状”和“卫星式”负荷分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nebulous and satellitic load distribution

为此,提出一种采用三绕组配电变压器的两级变压模式来协调就地负荷与远距离小容量分散负荷的配电需求。针对“星云状”和“卫星式”负荷,在配电变压器到负荷之间增加一个补充电压层级 U_m ,到用户侧再降至 0.4 kV,以降低配电线路损耗,同时扩大供电半径和输电容量,确保用户侧的电压质量。

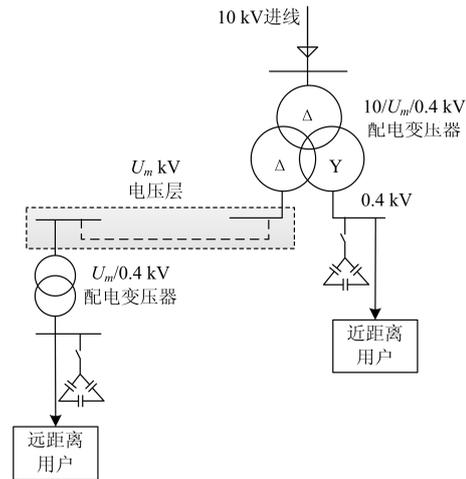


图 2 采用三绕组配电变压器的两级变压模式

Fig. 2 Two-stage transformation mode with three-winding distribution transformer

对已确定配电变压器位置和负荷分布情况的中低压配电台区,选择一个介于 0.4 kV 至 10 kV 之间的补充电压等级 U_m 。设置 $10/U_m/0.4$ kV、 $\Delta/\Delta/Y$ 形联结的三绕组配电变压器,高压侧接 10 kV 电源进线;低压侧输出额定电压 0.4 kV,经低压线缆直接向近区负荷供电;中压侧输出补充电压 U_m ,经电缆或架空线接至远距离负荷区,再由 $U_m/0.4$ kV 降压变压器降压供用户使用,由此形成采用三绕组配电变压器的两级变压模式,如图 2 所示。其中, $U_m/0.4$ kV 降压变压器可采用铁芯式、非晶合金式或电力电子式的变压器。0.4 kV 低压出线侧可装设无功补偿装置,以提高设备传输效率,改善功率因数和电能质量。为方便设备选型,补充电压 U_m 宜尽量选择

标准电压规范中规定的标称电压^[2], 且遵循配电网相邻电压等级不宜小于两倍的原则^[16]。

1.2 考虑配电网综合效益的配电电压选择目标函数

为使规划台区在所选配电方式和配电电压下的建设运营成本及节能降损效益达到综合最优, 建立规划年限内配电网全寿命周期成本(包括设备购置成本、运维成本、故障成本和废弃成本)和电量损失费用的电压选择目标函数 $W(U)$, 如式(1)所示。

$$\min W(U) = \sum_{i=1}^n [C_{Bi}^U + \sum_{j=1}^N (C_{Oij}^U + C_{Fij}^U) r_j + C_{Ai}^U r_N] + \sum_{j=1}^N \Delta L_j^U r_j \quad (1)$$

式中: n 为配电台区的购置设备总数; N 为规划年限; C_{Bi}^U 、 C_{Oij}^U 、 C_{Fij}^U 、 C_{Ai}^U 和 ΔL_j^U 均与所选电压 U 有关; C_{Bi}^U 为配电设备 i 的购置成本; C_{Oij}^U 、 C_{Fij}^U 分别为配电设备 i 在第 j 年的运行维护成本和故障成本; C_{Ai}^U 为配电设备 i 的废弃成本; ΔL_j^U 为第 j 年配电台区电量损失所产生的费用; r_j 表示第 j 年的贴现率, 可由 $(1+r_1)^{1-j}$ 计算, r_1 为利率; r_N 为规划年限中最后一年的贴现率。

1) 全寿命周期成本

购置设备的成本主要包含配电变压器、线缆、降压变压器及无功补偿设备。显然, 购置设备的数量与负荷采用何种配电模式有关。假设 1 台配变所覆盖的台区中, 有 m 个负荷片区, 其中 l 个为近距离负荷片区, 采用 0.4 kV 直配电方式, 需敷设 l 根线缆; 另外 $m-l$ 个为远距离负荷片区, 采用 $U_m/0.4$ kV 两级变压模式。采用两级变压模式的负荷, $U_m/0.4$ kV 降压变压器就装设于所供负荷片区内, 接至用户的 0.4 kV 出线很短, 可以忽略不计。因此向远距离负荷采用两级变压模式供电需敷设 $m-l$ 根线缆和 $m-l$ 个降压变压器。若单台配电变压器所供台区内, 计划安装 h 台无功补偿设备, 则需购置的设备数量 $n=2m-l+h+1$ 个。故关于配电电压 U 的设备购置成本 C_B^U 的计算方法为

$$C_B^U = \sum_{i=1}^n C_{Bi}^U = C_T^U + \sum_{x=1}^m c_x^U L_x + \sum_{x=1}^{m-1} C_{DTx}^U + \sum_{k=1}^h C_{Sk}^U \quad (2)$$

式中: C_T^U 为所选电压 U 下配电变压器的购置成本; L_x 和 c_x^U 分别表示配电变压器接至第 x 个负荷片区的线缆长度和该线缆关于所选配电电压 U 的单位长度成本; C_{DTx}^U 表示第 x 个远距离负荷片 $U_m/0.4$ kV 降压变压器的购置成本; C_{Sk}^U 为第 k 台补偿设备的购置成本。

运维成本包括配电网运行过程中的人工费、设备维护费用、停电检修损失费用和降损措施附加运行费用, 分别由 $12MQ/n$ 、 $f_M \delta_M C_{Bi}^U$ 、 $f_M W_{\text{loss},j} \sigma$ 及 $\mu_{\text{oe},x} f_M \delta_M C_{Bi}^U$ 表示^[17]。其中: M 和 Q 为月平均安排运行维护人员数和平均工资; f_M 为年平均设备维护频率; δ_M 为单次维护费用因数; $W_{\text{loss},j}$ 为第 j 年中单次设备检修造成的停电损失; σ 为单位电价; $\mu_{\text{oe},x}$ 为运行成本附加因子。

故障成本可由配网供电可靠性指标进行计算, 用 $E_{\text{OFF},j} \sigma$ 表示, $E_{\text{OFF},j}$ 为第 j 年因设备 i 引起的年电量不足期望。

废弃拆除成本由废弃成本和回收成本两部分构成, 可由 $(v_A + v_r) C_{Bi}^U$ 表示, 其中 v_A 和 v_r 分别为设备的废弃因数和回收因数。

2) 电量损失费用

损耗电量主要产生于配电变压器、线路和降压变压器。计第 j 年配电台区内由于电量损耗产生的直接、间接费用如式(3)所示。

$$\Delta L_j^U = (\sigma + K_j) \cdot \sum_{t=1}^{T_N} (P_{1t}^j + P_{2t}^j + P_{3t}^j) T \quad (3)$$

式中: T_N 为一年内损耗计算的时段数; T 为每个时段的时长; P_{1t}^j 、 P_{2t}^j 、 P_{3t}^j 分别表示第 j 年时段 t 内配电变压器、低压线缆和降压变压器的平均功率损耗, 均与所选配电电压等级 U 有关; K_j 表示第 j 年由于电量损失对 GDP 影响的转换系数。

由于补偿设备作用, 可忽略变压器无功对电网有功损耗的影响, 因此规划台区内的三绕组配电变压器和 $U_m/0.4$ kV 降压变压器的有功损耗 P_{1t}^j 和 P_{3t}^j 可由如式(4)、式(5)表示。

$$P_{1t}^j = P_{00} + \left(\frac{S_1^2}{S_{1N}^2} P_{k10} + \frac{S_2^2}{S_1^2 S_{2N}^2} P_{k20} + \frac{S_3^2}{S_1^2 S_{3N}^2} P_{k30} \right) \quad (4)$$

$$P_{3t}^j = \sum_{x=1}^{m-1} (P_{0x} + \beta_x^2 P_{kx}) \quad (5)$$

式中: P_{00} 为三绕组配电变压器的空载损耗; S_1 、 S_2 、 S_3 表示第 j 年 t 时段内三绕组配变高、中、低压侧的负载容量; S_{1N} 、 S_{2N} 、 S_{3N} 表示三绕组配变高、中、低压侧额定容量; P_{k10} 、 P_{k20} 、 P_{k30} 分别为三绕组配变高、中、低压侧的短路损耗; P_{0x} 为安装在第 x 个远距离用户处的 $U_m/0.4$ kV 降压变压器的空载损耗; β_x 为第 j 年 t 时段内降压变压器 x 的平均负载系数; P_{kx} 为降压变压器 x 的短路损耗。

考虑负荷大小、分布情况、供电半径、线缆型号和三相不平衡等因素的影响, 规划台区内配电网有功损耗 P_{2t}^j 的确定方式如式(6)所示。

$$P_{2t}^j = \sum_{x=1}^m 3(1 + \alpha_x) K_x^2 I_{av,x}^2 \rho_x L_x \quad (6)$$

式中： α_x 、 K_x 、 $I_{av,x}$ 分别为第 j 年时段 t 内线缆 x 的线损增加率(因负荷三相不平衡引起)、负荷形状系数、平均电流大小； ρ_x 为第 x 条线缆的电阻率。

由相关性分析可以得到用电量增长率 ζ_E 与 GDP 增长率 ζ_{GDP} 存在函数关系 $\zeta_E = f(\zeta_{GDP})$ ，令规划年限前一年的电量与 GDP 分别为 E_0 、 G_0 ，则可通过 GDP 预测增长率来计算规划年限中各年的电量增长情况^[18-19]。因此，第 j 年的电量增长转换系数为

$$K_j = \frac{E_0}{G_0} \prod_{j=1}^j \frac{\zeta_{GDP}^j}{f(\zeta_{GDP}^j)} \quad (7)$$

式中， ζ_{GDP}^j 为第 j 年的 GDP 增长率。

1.3 约束条件

1) 可靠性约束

① 供电可靠率约束

规划方案的供电可靠率不应低于规定的限制，一般用 RS-3 指标来描述系统持续供电能力。

$$R_1 = \frac{T_s - T_{off}}{T_s} \times 100\% \geq R_{1N} \quad (8)$$

式中： R_1 是由配电规划方案计算得出的 RS-3 指标； T_s 为统计总时间； T_{off} 为不计系统电源不足的停电时间； R_{1N} 为规定的 RS-3 指标下限。

② 用户平均停电时间约束

用户平均停电时间不得超过规定限制。

$$R_2 = \frac{\sum_{z=1}^{n_{off}} T_{off}^z \cdot N_{off}^z}{n_L} \leq R_{2N} \quad (9)$$

式中： R_2 是由配电规划方案计算得到的用户平均停电时间； T_{off}^z 和 N_{off}^z 为第 z 次停电事件中停电时间和停电用户数量； n_L 为用户总数； n_{off} 为停电次数； R_{2N} 为用户平均停电时长上限。

2) 电压质量约束

我国 20 kV 以下三相系统允许电压偏差不能超过标准电压的 $\pm 7\%$ ^[20]，故

$$\frac{|U_o - U_N|}{U_N} \times 100\% \leq 7\% \quad (10)$$

式中： U_o 、 U_N 分别为节点运行电压和额定电压。

3) 功率极限约束

线路传输功率不应超过其最大传输功率极限，一般用电流表示。

$$|I_x| \leq I_{x,max} \quad (11)$$

式中： I_x 为第 x 条线路上的负载电流； $I_{x,max}$ 为该线缆允许通过的电流上限。

2 配电电压和配电方案的选择流程

传统 0.4 kV 直配电方式成本较低，维护简单，但输送容量有限且线损较高，适合为距离配电变压器较近的负荷供电；两级变压模式中，补充电压等级 U_m 越高，输送容量越大，可有效降低距离较远的“星云状”和“卫星式”负荷供电的线损和电压损失问题，但投入和维护成本又比较高。因此，对负荷的配电方式规划需要同时考虑全寿命周期成本和电量损失产生费用的影响，通过合理选择配电电压来得到最佳配电方案。

对于确定安装位置的配电变压器，其覆盖台区内有 m 个负荷片区，每个负荷片区可以采用 0.4 kV 直配电和 $U_m/0.4$ kV 两级变压这两种配电方案。其中，两级变压模式的补充电压 U_m 可选择的配电电压等级取值方案有 M 种，故共有 $M(2^m - 1) + 1$ 种配电规划方案(其中含两级变压模式的配电方案有 $M(2^m - 1)$ 种，另一种配电方案全部负荷采用 0.4 kV 直配电方式)。根据所提的配电电压选择目标函数和约束条件，优选出综合效益最佳的配电方案和配电电压，确定流程如图 3 所示。

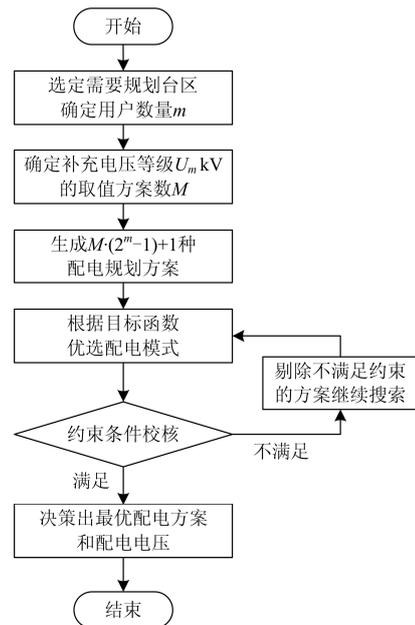


图 3 配电电压和配电方案的选择流程

Fig. 3 Selection process of distribution voltage and distribution plan

基于两级变压模式的配电电压选择流程包括如下步骤。

Step1: 选定需要规划的台区并确定台区内的负荷片区数量 m 。

Step2: 确定补充电压等级 U_m kV 的取值方案数 M ; 相邻电压等级不宜小于两倍, 为方便设备选型, 补充电压宜尽量选择国家规范中已有的标称电压。

Step3: 根据配电电压取值方案和台区负荷数量, 生成 $M(2^m - 1) + 1$ 种配电规划方案。

Step4: 根据式(1)的目标函数和式(2)一式(7), 选出满足目标函数的最优配电电压和配电方案。

Step5: 根据式(8)一式(11)的可靠性、电压质量和功率极限约束条件, 校核所选方案是否可行, 若满足约束条件, 则所选方案为最终决策方案; 若不满足约束条件, 则剔除此方案, 重复 step4, 直到选出满足条件的方案为止。

3 算例

利用本文提出的基于两级变压模式的配电电压选择方法对图4所示的4个负荷进行配电方式规划。1#~4#楼平均负荷水平为 80 W/m^2 , 每栋大楼面积约 1000 m^2 , 安装无功补偿后功率因数达到 0.9。在规划初始年基础上设负荷年增长率为 1.02, 台区因三相不平衡造成的损耗增量为 10%。1#~4#楼基本参数如表 1 所示。

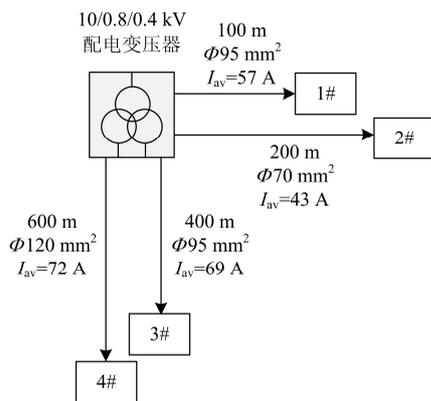


图 4 待规划配电方式的 1#-4#大楼

Fig. 4 Buildings 1#~4# to be planned distribution mode

表 1 1#~4#大楼的基本参数

Table 1 Basic parameters of buildings 1#~4#

楼号	1#	2#	3#	4#
供电半径 L_n/m	100	200	400	600
导线截面 Φ/mm^2	95	70	95	120
线损增加率 α_x			10%	
形状系数 K_x			1.14	
0.4 kV 配电时的平均电流 I_{av}/A	57	43	69	72

根据我国设备标准电压^[2]要求, 大于 0.4 kV 且小于 10 kV 的系统标称电压等级有 0.66 kV、1 kV、3 kV 和 6 kV, 为方便设备选型, 假设补充电压等级 U_m 的取值方案为 1 kV、3 kV 和 6 kV。显然, 待规划台区内有 4 个负荷片区, 补充电压等级的取值方案有三种, 因此共有 $3 \times (2^4 - 1) + 1 = 46$ 种配电方案。每种配电方案的配电电压和配电模式选择情况如表 2 所示, 表中“×”代表负荷采取 0.4 kV 直配电模式, 不需安装降压变压器, 电缆直接配电; “○”表示负荷采用 $U_m/0.4 \text{ kV}$ 两级变压模式供电, 需要安装降压变压器(在负荷全都采用 0.4 kV 直配电方式或 $U_m/0.4 \text{ kV}$ 两级变压模式时, 配电变压器选择双绕组即可)。

表 2 各配电方案的配电电压和配电模式选择

Table 2 Distribution voltage and mode of each plan

配电方案	配电电压	配电模式			
		1#	2#	3#	4#
1	全部负荷 0.4 kV 直配电	×	×	×	×
2、17、32		×	×	×	○
3、18、33		×	×	○	×
4、19、34		×	○	×	×
5、20、35		○	×	×	×
6、21、36		○	○	×	×
7、22、37		○	×	○	×
8、23、38	部分负荷 0.4 kV 直配电/ 其他负荷分布采用补充电	○	×	×	○
9、24、39	压 1 kV/3 kV/6 kV 配电	×	○	○	×
10、25、40		×	×	○	○
11、26、41		×	×	○	○
12、27、42		○	○	○	×
13、28、43		○	×	○	○
14、29、44		○	○	×	○
15、30、45		×	○	○	○
16、31、46		○	○	○	○

根据台区负荷情况, 选取三绕组配电变压器容量 400 kVA(100/50/50), 表 3 给出了配电变压器在选择补充电压等级情况下的基本参数和价格(若配电变压器为双绕组变压器, 则其空载损耗和短路损耗分别取 565 W 和 4300 W)。

表 3 配电变压器基本参数

Table 3 Parameters of distribution transformer

电压/kV	容量/ kVA	$P_{k10}/$ W	$P_{k20}/$ W	$P_{k30}/$ W	$P_{\infty}/$ W	售价/ 万元
10/0.8/0.4		1834.8	1624.3	748.6	565	5.863
10/3/0.4	400	1844.5	1429.4	892.1	604	6.240
10/5/0.4		1847.8	1316.6	954.3	630	6.632

根据每栋大楼负荷情况, 选取 S11 型 100 kVA 的降压变压器, 基本参数如表 4 所示。不同额定电压的电缆单价及参数如表 5 所示。

表 4 降压变压器基本参数

Table 4 Parameters of step-down transformer

电压/kV	容量/kVA	P_0 /W	P_k /W	售价/万元
0.8/0.4	—	200	1200	1.25
3/0.4	100	200	1400	1.42
5/0.4	—	200	1500	1.50

表 5 电缆参数

Table 5 Cable parameters

电缆额定电压/kV	1	3	6
单位电阻率/ (Ω /km)	$\Phi 70 \text{ mm}^2$	—	0.268
	$\Phi 95 \text{ mm}^2$	—	0.193
	$\Phi 120 \text{ mm}^2$	—	0.153
单价/(元/km)	$\Phi 70 \text{ mm}^2$	96.7	132.2
	$\Phi 95 \text{ mm}^2$	119.8	167.4
	$\Phi 120 \text{ mm}^2$	142.2	194.7

安排一名人员对该配电台区进行运行维护，月平均工资 1000 元；线缆和变压器平均维护频率 2 次/年，单次维护费用因数 0.01；由于设备检修造成的停电损失为 2 元/ $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ；每次检修配变平均停电 2 h，检修降压变压器和线缆平均停电 0.5 h；配变故障率 0.02，配变故障造成的平均故障停电时间 5 h，线路故障率为 0.1/km，线缆故障造成的平均故障停电时间为 1 h，降压变压器故障率 0.05，降压变压器故障造成的平均故障停电时间为 2 h；由故障造成的停电损失为 20 元/ $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ；废弃因数和回收因数分别取 0.1 和 0.2。在每个终端分别安装并联电容分散补偿，单台价格 400 元。单位电价 0.55 元/kWh，不计运行成本附加因素。

根据文献[21]，假设规划初始年的 GDP 转换系数为 1.47 元/kWh，认为社会用电量增长率与 GDP 为线性关系，后者与前者之比为 1.1。配电网设计规划年限 20 年，暂不考虑贴现因素。

对所列举的 46 种配电方案，分别计算其所选配电电压和配电模式下的设备购置成本、运行维护成本、故障成本、废弃成本和电量损失产生的费用。其他得到电压选择目标函数计算结果如表 6 所示。

根据计算得到的目标函数结果，方案 26 为所有方案中目标函数数额最小的。计算结果表明，负荷选择不同配电电压和不同配电模式的组合带来的目标函数是变动的，尽管采用 U_m kV 补充电压配电模式会增加设备购置成本和运维成本，但配电线路上的损耗也大幅度降低，使电量损耗产生的费用下降。因此，方案 26 具有最优的目标函数结果：125.35 万元。方案 26 所选的补充电压为 3 kV，1#、2#大

表 6 电压选择目标函数的计算结果

Table 6 Objective function results at selected voltage

方	目标函数	方	目标函数	方	目标函数
案	结果/万元	案	结果/万元	案	结果/万元
1	204.81	(全部负荷采用 0.4 kV 直配电)			
	补充电压 1 kV		补充电压 3 kV		补充电压 6 kV
2	168.33	17	156.86	32	158.70
3	179.21	18	171.46	33	172.75
4	203.88	19	205.39	34	206.53
5	210.64	20	213.49	35	214.99
6	211.32	21	209.70	36	211.42
7	190.47	22	179.50	37	181.36
8	179.91	23	169.02	38	167.01
9	181.23	24	168.97	39	170.47
10	170.56	25	154.60	40	156.02
11	150.69	26	125.35	41	126.92
12	198.60	27	183.01	42	185.09
13	172.21	28	143.43	43	145.58
14	188.32	29	168.99	44	171.00
15	160.41	30	130.40	45	132.18
16	156.79	31	129.09	46	131.46

楼采用 0.4 kV 直配电方式，线路直接从三绕组配电变压器低压侧出线接至大楼供电；3#和 4#大楼采用两级变压模式，三绕组配电变压器中压侧引出的 3 kV 电缆接至楼下 3/0.4 kV 降压变压器，经降压后再为用户供电。下面进一步校验方案 26 的供电可靠性和电压质量等是否满足约束条件。

若规定配电网供电可靠率不得低于 99.98%，用户平均停电时间小于 3 h/户·年，电压偏差不得超过标准电压的 $\pm 7\%$ ，25 $^{\circ}\text{C}$ 下的线缆最大载流量不得超过相关标准中的规定。

由式(8)一式(11)可以计算出方案 26 的 RS-3 供电可靠性指标为 99.9951%，用户平均停电时间 0.1825 h/户·年，均小于规定值。1#~4#楼处的电压偏离分别为 0.5575%、1.1374%、0.0456%、0.0573%，均小于 7% 的上限，线路传输电流也不超过电缆载流量要求。若 3#和 4#楼不采用两级变压模式，则电压损失百分比分别为 2.6995%、3.3448%，电压质量有明显提高；当负荷增加为原来的一倍，采用 0.4 kV 直配电方式 3#和 4#楼的线路电压损失百分比可达 5.3990%和 6.6896%，电压质量处于不良状态，特别是 4#楼的电压损失接近 7%，基本不符合国家供电质量标准要求。故对距离配电变压器较远的“星云状”负荷和“卫星式”负荷，采用两级变压模式能显著提高线路末端的电压质量。

因此方案 26 为优选出的最佳配电方案：1#、2#楼采用 0.4 kV 直配电方式，3#、4#楼采用两级变压

模式, 补充配电电压等级选择 3 kV。最优配电方案 26 与传统 0.4 kV 直配电方式(即方案 1)相比, 综合成本节约了 79.46 万元, 降幅达 38.8%, 节约效果显著。

比较 0.4 kV 直配电方式(方案 1)与基于两级变压模式的其他配电方案可知, 虽然直配电方式的投资管理成本较低, 但并非最佳配电方式, 这是因为传统直配电方式难以兼顾近距离组团负荷与远距离分散负荷的高效配电需求, 距离配变较远的负荷, 其配线上必然产生较大损耗, 导致电能损失费用较高, 综合效益并不理想。横向比较方案 11、26 和 41(1#、2#楼采用 0.4 kV 直配电方式, 3#、4#楼采用两级变压模式), 可以发现: 在负荷采用相同配电模式下, 选择不同的配电电压也将造成综合成本的不同, 综合成本与配电电压有凹函数关系, 随着配电电压的升高, 综合成本逐渐降低至一个最低值, 然后反增。这是因为: 提高配电电压, 虽然能在一定范围内减少电量损失产生的直接、间接费用, 从而降低综合成本; 但当配电电压提升到一定程度之后, 损耗降低节约的费用不足以抵消设备投入和维护成本的增加, 综合成本反而升高。纵向比较配电电压相同、配电模式不同的各配电方案, 可以发现对距离较远的负荷采用两级变压模式对综合成本的降低作用较显著, 因此供电半径是影响配电模式选择的最主要因素。

算例分析结果表明, 通过优选配电电压和配电模式能够协调远、近距离负荷节能高效的供电需求, 在满足配电网安全可靠运行的基础上, 具有更好的综合效益。

4 结论

针对现有配电方式难以兼顾近距离组团负荷与远距离分散负荷的节能、高效配电需求问题, 本文提出一种基于两级变压模式的配电电压选择方法, 对解决距离配电变压器较远的“星云状”和“卫星式”负荷的线路损耗和电压质量问题有很好的实用意义。

1) 综合考虑配电网的全寿命周期成本和电量损失产生的直接、间接费用作为配电电压和配电模式选择的目标函数, 同时计及可靠性、电压质量和功率极限等约束条件, 确保所选配电电压和配电模式综合效益最优。

2) 提出采用三绕组配电变压器的两级变压模式对“星云状”和“卫星式”负荷配电, 方式灵活, 实用性强。

参考文献

- [1] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluating method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.
- [2] 标准电压: GB/T 156—2007[S].
Standard voltages: GB/T 156—2007[S].
- [3] 王玉华, 赵志英, 李颖峰, 等. 供配电技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [4] 民用建筑电气设计规范: JGJ16—2008[S].
Code for electrical design of civil buildings: JGJ16—2008[S].
- [5] VENKATA S S, RUDNIK H. Distribution systems their past present and future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 7-8: 50-67.
- [6] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 129-136.
ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Development of low voltage distribution networks reactive power compensation and benefit assessment system and its application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 129-136.
- [7] 李颖峰. 低压配电网无功补偿方式及优化研究[J]. 电气应用, 2008, 27(19): 53-55.
LI Yingfeng. Research on reactive power compensating modes and optimization for low voltage distribution network[J]. Electric Application, 2008, 27(19): 53-55.
- [8] 康成功, 李献伟, 张国军. 分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 99-105.
KANG Chenggong, LI Xianwei, ZHANG Guojun. Research on power quality control incorporating distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 99-105.
- [9] SINGHA B, CHANDRAB A, AL-HADDADB K, et al. Reactive power compensation and load balancing in electric power distribution system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20(6): 375-381.
- [10] 熊卿, 张哲, 尹项根, 等. 新型配电变一体化静止无功补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 59-64.
XIONG Qing, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on novel technology of distribution transformer

- and static VAR compensator integration system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 59-64.
- [11] 李珊, 苏永丽, 康积涛. 有载调压变压器对电压稳定的影响综述[J]. 变压器, 2012, 49(2): 19-23.
LI Shan, SU Yongli, KANG Jitao. Summarization of Influence of on-load-tap-changing transformer to voltage stability[J]. Transformer, 2012, 49(2): 19-23.
- [12] 王光亮. 有载调压变压器对电压稳定性影响综述[J]. 继电器, 2008, 36(11): 79-84.
WANG Guangliang. A survey on effect of on-load tap changer on the voltage stability[J]. Relay, 2008, 36(11): 79-84.
- [13] 马成祥. SVR 馈线自动调压器的特点及应用[J]. 农村电气化, 2009(3): 46-47.
MA Chengxiang. Characteristics and application of SVR feeder automatic voltage regulator[J]. Rural Electrification, 2009(3): 46-47.
- [14] 李军鹏. 馈线自动调压器的应用[J]. 农村电气化, 2008(10): 18-19.
LI Junpeng. Application of feeder automatic voltage regulator[J]. Rural Electrification, 2008(10): 18-19.
- [15] 刘成峰. 阳春配电网电压控制策略与低压电压补偿装置应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LIU Chengfeng. The research of distribution network voltage control strategy and application of voltage regulator in Yangchun[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [16] 蒋森科. 城网电压等级选择比较分析[C] // 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集(上册), 10月24-27, 2008, 北京, 中国: 216-218.
JIANG Senke. Comparison and analysis of voltage level selection in urban power grid[C] // Proceedings of 24rd CSU-EPSA (Volume One), October 24-24, 2008, Beijing, China: 216-218.
- [17] 杨文锋, 王彬宇, 程卓, 等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2598-2604.
YANG Wenfeng, WANG Binyu, CHENG Zhuo, et al. Optimized decision approach of loss reduction plan for medium- and low-voltage urban distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2598-2604.
- [18] 黄毅. 基于 Copula 函数的用电量与 GDP 相关性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2010.
HUANG Yi. Dependence analysis of electricity consumption and GDP based on copula function[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2010.
- [19] 冷华, 陈鸿琳, 李欣然, 等. 基于功率或电量预测的智能配电网统计线损同期化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 108-114.
LENG Hua, CHEN Honglin, LI Xinran, et al. A method for synchronous line loss statistics of distribution network based on load or electricity consumption forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 108-114.
- [20] 电能质量 供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S].
Power quality-deviation of supply voltage: GB/T 12325—2008[S].
- [21] 林晓. 海南省电力与经济的关系研究和实证分析[D]. 海口: 海南师范大学, 2012.
LIN Xiao. The study and empirical analysis on the relationship between Hainan provincial electric power and its economy[D]. Haikou: Hainan Normal University, 2012.

收稿日期: 2017-01-24; 修回日期: 2017-06-22

作者简介:

熊小伏(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: cqxxf@vip.sina.com

匡仲琴(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向配电网经济运行。E-mail: 731882499@qq.com

(编辑 姜新丽)