

对优化城市配电网基本结构的探讨

袁北勇

(无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘 要: 通过归纳、分析目前 10kV 城市配电网的结线和运行现状, 看到由于受到网络结构的限制, 现网络的潜力已接近极限。要进一步提高配网的受、供电能力、各项功能和技术指标, 需改进配电网的基本结构。为此, 提出了城市配网“扁日形”基本单元的构思, 使‘网’由紧密连结的‘格’组成。在“扁日形”基本单元网中, 开闭所、配电所接单元网不同的边线, 各用户都有双电源。对基本单元网各项技术性能定量分析后得, 供电相同负荷时, 线路损耗下降 80%、电压损耗下降 73%、短路容量增大, 但在容许范围内。由此表明“扁日形”基本单元网具有明显的优越性和可行性。

关键词: 配网; 优化; 结构; 探讨

0 引言

城市配电网是供、用电之间的枢纽。它的功能表现为, 受、供电能力和电能质量, 优质与否直接影响着城市的经济建设与发展, 随着高新技术、高科技产品迅速增加, 城市用电结构和要求发生了巨大的变化。对电能质量的要求也快速提高, 具备充足的供电能力、不间断供电、高质量电能、稳定的电压等已属基本要求。

为此我们需要优化配电网结构、吸收发达国家城市配网的先进技术, 结合本地区实际情况, 规划出受、供电能力强、功能齐全、供电可靠性高、电能质量达标的有发展余度的新型配电网架。并有计划地分步实施, 满足经济建设的需要, 使城市配电网成为经济发展的福星。

1 城市配电网的接线现状

1.1 放射型也称树干型 (见图 1)

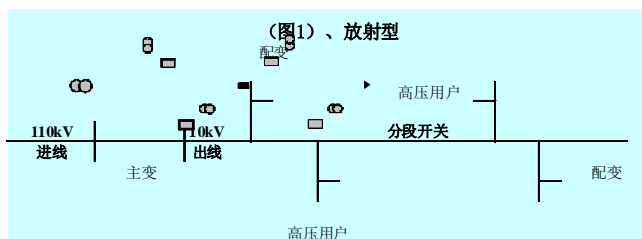


图 1 放射型接线方式

这种接线方式适用于非重要用户和非市中心供电。干线一般分为 2-3 段, 支线较长的装分支开关, 缩小事故和检修停电范围。目前主要用于我市负荷轻、分散的市郊和农村。线路较长, 供电半径 3~6 km。干线一般使用 LGJ-120, 逐段减小。电压降较大、电能质量不易保证、供电可靠性低。常因检修、施工和事故抢修使整条线路停电。但接线简单成本低, 调度操作简单。

1.2 手拉手型 (见图 2)

这种接线方式是城区主要接线型式。用于重要负荷、双电源用户和负荷密集的市中心区域, 供电

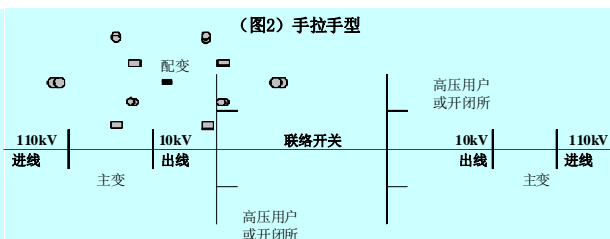


图 2 手拉手型接线方式

可靠率较高。两条线路由不同变电所或同一变电所不同母线供出。线路较短, 供电半径 1-1.5km。主干线多采用 YJV22-8.7/15-3×400mm² 电缆线, 电压降小、电能质量较好。

主干线一般用开关分成 2 段, 两条线路汇合处用环网柜联接, 构成手拉手型式。但调度操作较烦琐, 线路使用效率在实现手拉手时只有 50%。又因线路负荷密度大, 负载往往大于 60% (最高达 70% 以上), 使手拉手方式无法实施。因检修、施工和事故抢修把整条线路停电的现象也经常有。

1.3 用户双电源接线 (见图 3、4)

用户、开闭所、配电所的双电源，主要由（图 3）不同变电所的两条线路或（图 4）同一变电所不

同母线的两条线路提供。前一种双电源可靠性较高，后一种双电源可靠性降低。

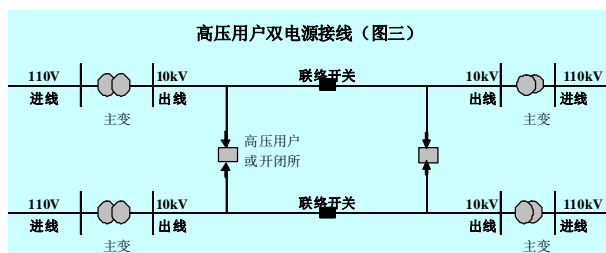


图 3 由不同变电所的两条线路提供用户双电源

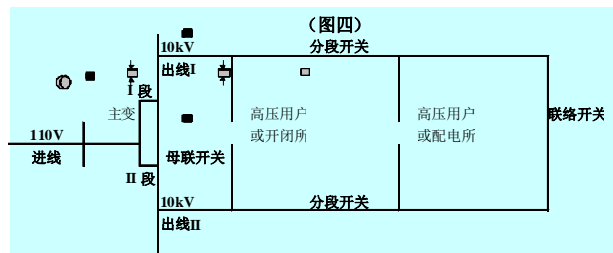


图 4 由同一变电所不同母线的两条线路提供用户双电源

1.4 农村配电网改造

目前无锡城市配电网改造已告一段落，市中心区域内全部采用电缆线路，近郊还有一部分架空绝缘线路，农村仍以架空线路为主。主要措施有：

（1）按规划要求在市区增加 220kV 和 110kV 变电所布点，逐步升级、扩容早期建设的 35kV 变电所至 110kV 级；

（2）增加 10kV 出线数量，减小供电半径，增大导线截面、调大出线电流互感器，提高单线容量。

（3）实现线路手拉手接线、增加线路分段，减小线路检修、施工、事故停电范围，提高供电可靠率。

上述城网改造使城市配网供电能力已能满足目前的用电水平。可是负荷还在不断增加，对电能质量、供电可靠率要求越来越高，而城市线路通道和变电所布置点越来越少，高压电源通道更是紧张。如何进一步提高配网的供电能力、电能质量、供电可靠率、线路使用效率，是城市配网面临的一个十分紧迫的课题。

2 改进城市配电网结线型式的设想

2.1 “改造配网，规划先行”

由于网络结构的限制，进一步提高配网的各项技术指标难度较大。

笔者认为，现网络结构的潜力已接近极限，余度有限。要增强配网的受、供电能力、各项功能和技术指标，需改进配电网的基本结构。

就是要有一个优化的配网结构，这网架应结构合理、联系紧密、灵活可靠、容量大、具有超前的容量，还要最大限度地利用原线路。

我们设想一个“扁日型”单元网。四个角按要求接入电源线承担负载，单元网格间联系紧密又相对独立，能量自动均衡。网格线均可连接负荷、不同网格线可视作不同电源，即可接用户又能提供双电源。

故障时准确、快速、可靠地切除故障段网格线。某段线切除后，不影响整个单元网正常运行。再用若干个单元网，根据实际情况组成城市配电网。

2.2 城市配网改进接线单元网介绍（见图 5）

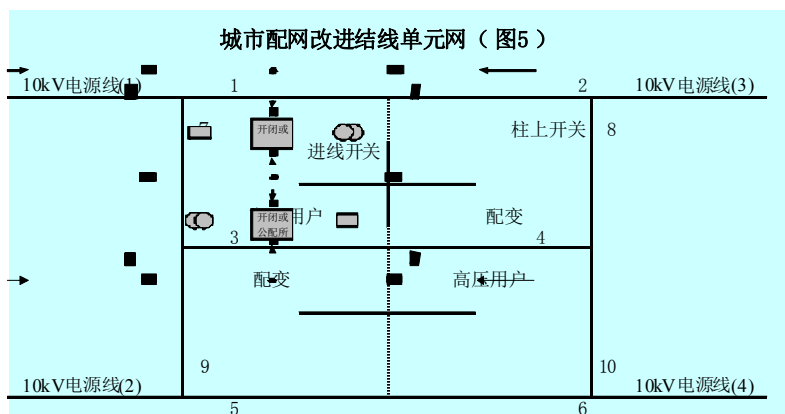


图 5 城市配网改进接线单元网

(1) 把线路改接成多个如图“扁日形”单元网。这单元网中每一边线两端分别安装柱上断路器（或电缆开关柜），使每段线路都能够被切断，保证故障切除和日常的检修、抢修工作能够正常进行。

(2) 各断路器均处在闭合位置，即接通工作状态。

(3) 10kV 电源线路，从四个角分别接入，容量与单元网中的负荷平衡。当电源线路容量确定后，用增减线路条数来平衡。

(4) 电源线的容量和数量按 N-1 规划原则确定。保证某一条电源线因故退出运行时，剩余的 N-1 条线路仍能维持原用电容量。

(5) 用户接入：将高压用户、配变和低压负荷，均接入开闭所或公配所（如图中所示）。开闭所、公配所均有二个电源，分别接在不同的网格线段上。

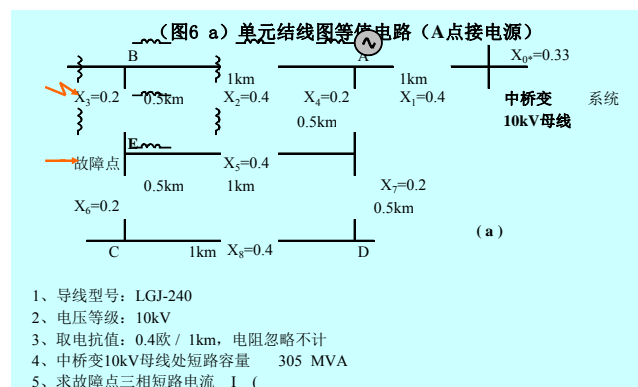


图 6 a 为单元结线等值及简化电路 E 点短路 A 点接电源

设：导线型号 LGJ-240；额定电压 $U_e = 10\text{kV}$ ；线路电抗 $X = 0.4/\text{km}$ ，忽略电阻；线路各段长度、电抗值标于等值电路图中；

中桥变 10kV 母线处短路容量 305 MVA；鸿桥变 10kV 母线处短路容量 317MVA；电压基准值 $U_B = 10\text{kV}$ 、容量基准值 $S_B = 100\text{MVA}$ ；等值电路（见图 6）。

(1) 用串、并联法求得 10kV 母线到故障点 E 的电抗 $X_9 = 0.66 \Omega$ ， $\therefore X_B = U_B^2 / S_B$ ；代入 $U_B = 10\text{kV}$ 、 $S_B = 100\text{MVA}$ 得 $X_9^* = X_9 / X_B = 0.66 / 1 = 0.66$ 、系统电抗标么值 $X_0^* = S_B / S = 100 / 305 = 0.33$

(2) 系统到故障点的总电抗标么值 $X_{10}^* = 0.66 + 0.33 = 0.99$ ；

(3) E 点短路容量 ($S_d / S_B = 1 / X_{10}^*$)， $S_d = 100 / 0.99 = 100\text{MVA}$ ；

进线开关配置‘备自投’。正常运行时一个电源工作，另一个电源处于热备用状态。

(6) 保护配置：图中 1-2, 3-4, 5-6 断路器配置差动保护，7-3-9, 8-4-10 需配置三点差动保护，区内故障时迅速切除该段线路。10kV 电源线路的保护基本不变，要求二段速动保护延伸到最近的两个断路器内，保证电源线路全线在速断保护区内。

3 对单元网的技术与经济分析

3.1 (E) 点短路电流计算

单元网四个角均接入电源时，(E) 点三相短路容量及短路电流：

3.1.1 110kV 中桥变电源线路接 A 点

求 E 点三相短路容量及短路电流 S_d 、 I_d （见图 5）

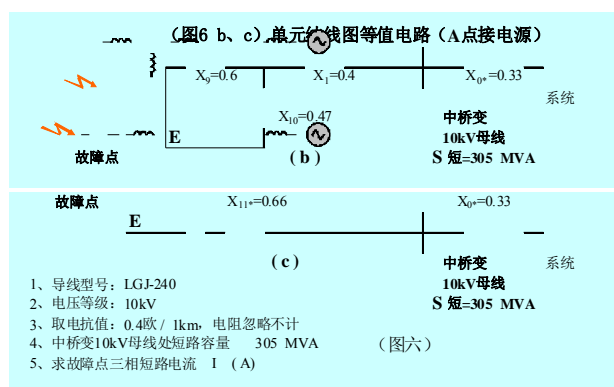


图 6 bc 为单元结线等值及简化电路 E 点短路 A 点接电源

(4) E 点短路电流 ($S_d = \sqrt{3} U_d I_d$)， $I_d = 5.8\text{kA}$

3.1.2 110kV 中桥变电源线路接 D 点

(E) 点三相短路容量及短路电流
 $S_d = 100\text{MVA}$ ， $I_d = 5.8\text{kA}$ ；

3.1.3 110kV 鸿桥变电源线路接 B 点（见图 7）

(E) 点三相短路容量及短路电流
 $S_d = 113\text{ MVA}$ $I_d = 6.52\text{ kA}$

3.1.4 110kV 鸿桥变电源线路接 C 点（见图 7）

(E) 点三相短路容量及短路电流
 $S_d = 113\text{ MVA}$ $I_d = 6.52\text{ kA}$

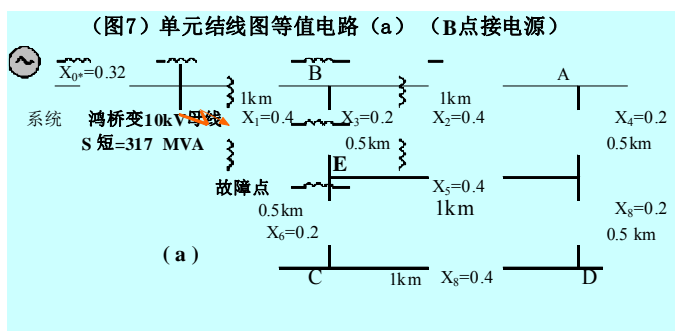


图 7 a 为单元结线图等值及简化电路 E 点短路 B 点接电源

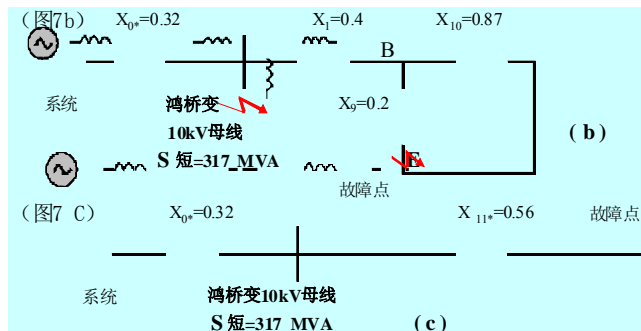


图 7 b、c 为单元结线图等值及简化电路 E 点短路 B 点接电源

3.2 (F) 点短路电流计算

单元网四个角均接入电源时，(F) 点三相短路容量及短路电流

3.2.1 110kV 中桥变电源线接 A 点 (见图 8)

(F) 点三相短路容量及短路电流

$$S_d = 100 \text{ MVA} \quad I_d = 5.82 \text{ kA}$$

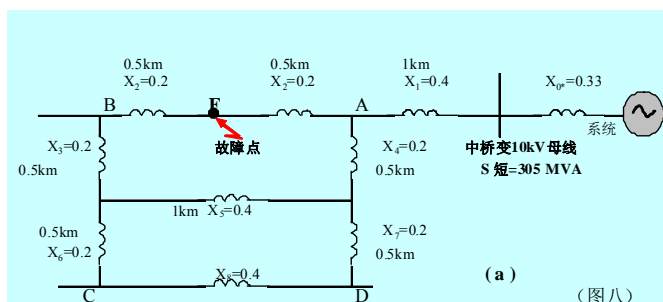


图 8 a 为单元结线图等值及简化电路 F 点短路 A 点接电源

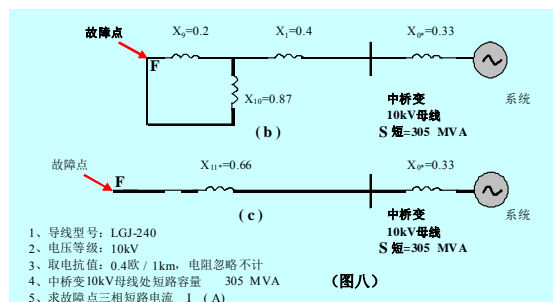


图 8 bc 为单元结线图等值及简化电路 F 点短路 A 点接电源

3.2.2 110kV 中桥变电源线接 D 点

(F) 点三相短路容量及短路电流

$$S_d = 84 \text{ MVA}, I_d = 4.85 \text{ kA}$$

3.2.3 110kV 鸿桥变电源线接 B 点 (见图 8)

(F) 点三相短路容量及短路电流

$$S_d = 113 \text{ MVA}, I_d = 6.52 \text{ kA}$$

3.2.4 110kV 鸿桥变电源线接 C 点

(F) 点三相短路容量及短路电流

$$S_d = 85 \text{ MVA}, I_d = 4.9 \text{ kA}$$

3.3 单元网中接入负荷后的电流分布计算

3.3.1 负荷分配第一种情况时的各电流值计算 (见图 9、10)

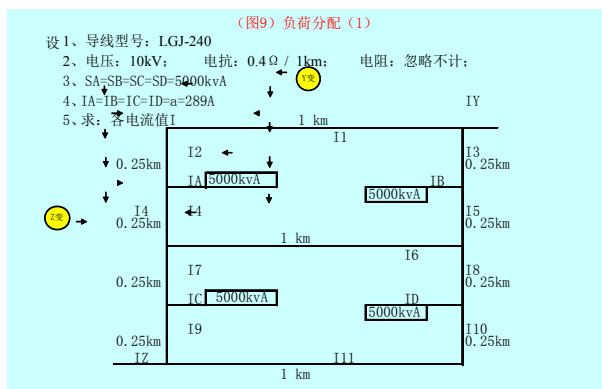


图 9 为负荷分配 (1) 图

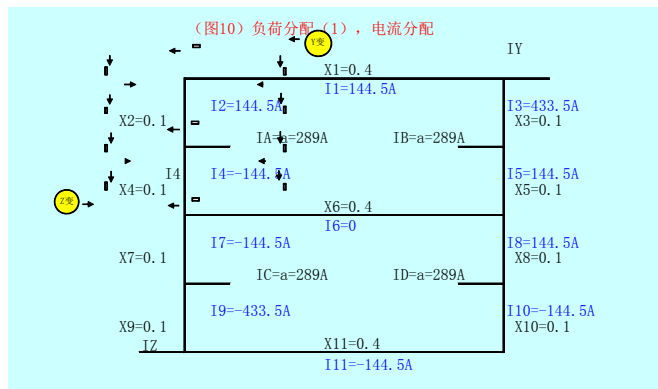


图 10 为负荷分配 (1) 电流分布图

列出电流方程 8 组，电压方程 3 组：

$$(1) I_Y = I_2 + I_3; (2) I_Z = -I_9 - I_{10}; (3) I_2 = I_4 + a; (4)$$

$$I_3 = I_5 + a; (5) I_4 = I_7 - I_6; (6) I_5 = I_6 + I_8; (7) I_7 = I_9 + a;$$

$$(8) I_8 = I_{10} + a; (9) 0.1I_3 + 0.1I_5 + 0.4I_6 = 0.5I_2 + 0.1I_4;$$

(10) $0.5I_2+0.1I_4+0.1I_7+0.1I_9=$
 $0.1I_3+0.1I_5+0.1I_8+0.5I_{10}$; (11) $I_Y \cdot X_{\text{总}} = I_Z \cdot X_{\text{总}}$

联立解 11 组方程, 得各电流值 I , 并标于 (图 10) 中。

$I_1=I_2=144.5\text{A}$; $I_3=433.5\text{A}$; $I_4=-144.5\text{A}$;

$I_5=144.5\text{A}$; $I_6=0$; $I_7=144.5\text{A}$; $I_8=144.5\text{A}$; $I_9=-433.5\text{A}$;
 $I_{10}=I_{11}=-144.5\text{A}$; $I_Y=578\text{A}$; $I_Z=-578\text{A}$ 。

3.3.2 负荷分配第二种情况时的各电流值计算, 见 (图 11)

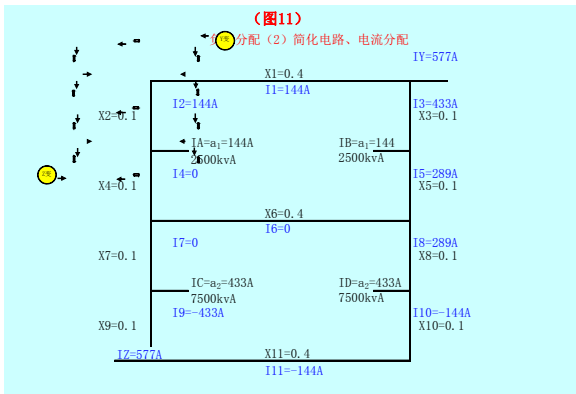


图 11 负荷分配 (2) 简化电路、电流分配图

列电流方程 8 组, 电压方程 3 组: (各方程除 a_1 、 a_2 负荷电流, 取代 a 外, 形式一样, 数量相同)

联立解 11 组方程, 得各电流值 I , 并标于 (图 11) 中。

$I_1=144\text{A}$; $I_2=144\text{A}$; $I_3=433\text{A}$; $I_4=0$; $I_5=289\text{A}$;
 $I_6=0$; $I_7=0$; $I_8=289\text{A}$;

$I_9=-433\text{A}$; $I_{10}=-144\text{A}$; $I_{11}=-144\text{A}$ 。

3.4 电能损耗和电压损耗计算

设: 各负载功率系数为 $\cos\varphi=0.8$ 、 $\sin\varphi=0.6$ 、
导线型号: LGJ-240 并计入导线电阻标于图中、年
最大负荷利用小时 6000 小时/年。

3.4.1 对负荷分配第一种情况进行电能、电压损耗计
算 (见图 12)

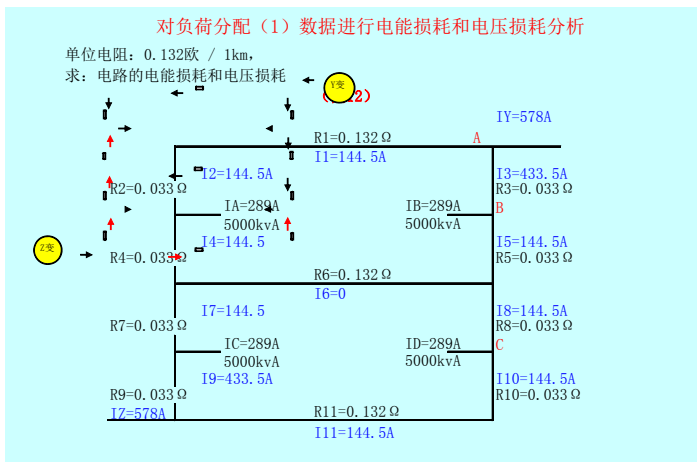


图 12 为对负荷分配 (1) 数据进行电能和电压损耗分析图

(1) 电能损耗: $\Delta P=I^2R$ 、 $\Delta W=I^2R \cdot t$ (计算
略)

$\Delta P_{\text{单线}}=22.04954\text{ kW}$

三线总损耗:

$\Delta P_{\text{总}}=3 \cdot \Delta P_{\text{单线}}=3 \cdot 22049.54=66.14862\text{ kW}$

全年损失总电量: 以每年最大负荷利用小时
6000 计算

$\Delta W=\Delta P_{\text{总}} \cdot 6000=66.14862 \cdot 6000=39.7\text{ 万 kWh}$

(2) 电压损耗:

$P=\sqrt{3}UI\cos\varphi$ 、 $Q=\sqrt{3}UI\sin\varphi$ 、

$$\Delta U = (PR + QX) / U_e$$

$$\Delta U_{AB} = \frac{\sqrt{3} \times 10 \times 433 \times 0.8 \times 0.033 + \sqrt{3} \times 10 \times 433 \times 0.6 \times 0.1}{10}$$

$$= 65V$$

$$\Delta U_{BC} = \frac{\sqrt{3} \times 10 \times 144.5 \times 0.8 \times 0.066 + \sqrt{3} \times 10 \times 144.5 \times 0.6 \times 0.2}{10}$$

$$= 43V$$

$$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} = 65 + 43 = 108V$$

$$\Delta U_{AC}\% = 108 / 10000 \times 100\% = 1.08\%$$

3.4.2、对负荷分配第二种情况进行电能、电压损耗计算（见图 13）

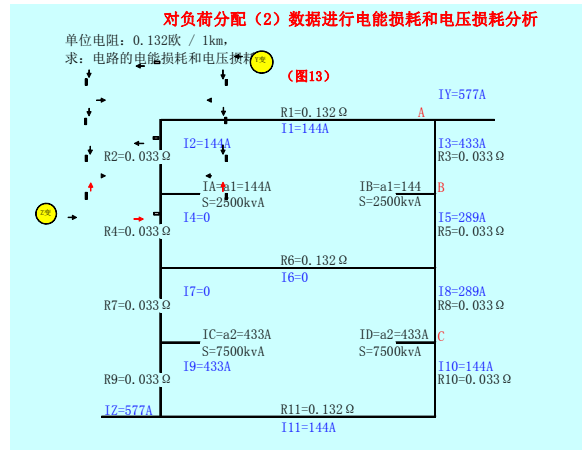


图 13 为对负荷分配（2）数据进行电能和电压损耗分析图

（1）电能损耗： $\Delta P = I^2 R$ 、 $\Delta W = I^2 R \cdot t$ （计算略）

$$\Delta P_{\text{单线}} = 24.72954 \text{ kW}$$

三线总损耗：

$$\Delta P_{\text{总}} = 3 \times \Delta P_{\text{单线}} = 3 \times 24.72954 = 74.18862 \text{ kW}$$

全年损失总电量：

$$\Delta W = \Delta P_{\text{总}} \times 6000 = 74.18862 \times 6000 = 44.5 \text{ 万kWh}$$

（2）电压损耗： $\Delta U = (PR + QX) / U_e$

$$\Delta U_{AB} = \frac{\sqrt{3} \times 10 \times 433 \times 0.8 \times 0.033 + \sqrt{3} \times 10 \times 433 \times 0.6 \times 0.1}{10}$$

$$= 65V$$

$$\Delta U_{BC} = \frac{\sqrt{3} \times 10 \times 289 \times 0.8 \times 0.066 + \sqrt{3} \times 10 \times 289 \times 0.6 \times 0.2}{10}$$

$$= 87V$$

$$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} = 65 + 87 = 152V$$

$$\Delta U_{AC}\% = 152 / 10000 \times 100\% = 1.52\%$$

3.4.3 分成两条线路供同样负荷时（其它条件不变）的电能、电压损耗计算（见图 14）

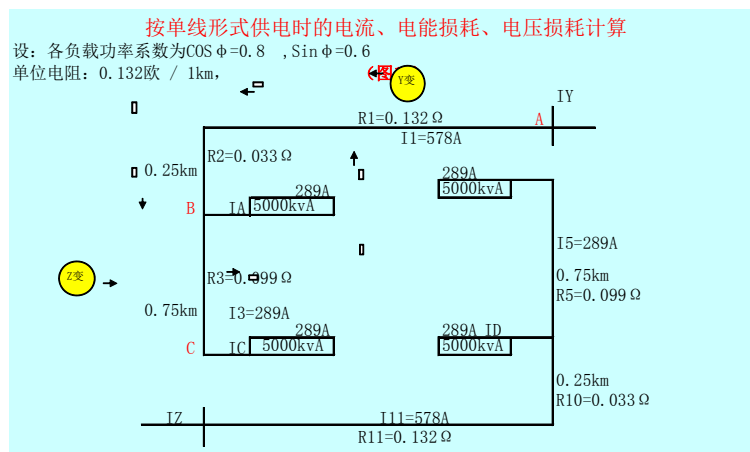


图 14 为按单线形式供电时的电流、电能、电压损耗计算图

(1) 电能损耗:

$$\Delta P_{Y\text{单线}} = I_1^2(R_1 + R_2) + I_3^2 R_3$$

$$= 578^2 \times 0.165 + 289^2 \times 0.099 = 63.4 \text{ kW}$$

$$\Delta P_{Z\text{单线}} = I_1^2(R_{11} + R_{10}) + I_5^2 R_5$$

$$= 578^2 \times 0.165 + 289^2 \times 0.099 = 63.4 \text{ kW}$$

$$\Delta P_{\text{总单线}} = \Delta P_{Y\text{单线}} + \Delta P_{Z\text{单线}} = 2 \times 63.4 = 126.8 \text{ kW}$$

三线总损耗:

$$\Delta P_{\text{总}} = 3 \times \Delta P_{\text{总单线}} = 3 \times 126.8 = 380.4 \text{ kW}$$

全年损失总电量:

$$\Delta W = 380.4 \times 6000 = 228.2 \text{ 万 kWh}$$

(2) 电压损耗: $\Delta U = (PR + QX) / U_e$

$$\Delta U_{AB} = (8000 \times 0.165 + 6000 \times 0.5) / 10 = 432 \text{ V}$$

$$\Delta U_{BC} = (4000 \times 0.099 + 3000 \times 0.3) / 10 = 130 \text{ V}$$

$$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} = 432 + 130 = 562 \text{ V}$$

$$\Delta U_{AC}\% = (562 / 10000) \times 100\% = 5.62\%$$

电压损耗 > 5% 允许电压损耗

4 分析归纳

(1) 短路容量、电流分析归纳 (见图 6)

(2) F 点短路容量小于 E 点短路容量;

(3) 用叠加原理可得, 单元网四个角全部接上独立电源时, E 点发生三相短路最严重。故障点短路总电流为:

$$I_{dmas} = I_A + I_B + I_C + I_D = 5.8 + 6.52 + 6.52 + 5.8 = 24.64 \text{ kA};$$

(4) 流过 7、9 号开关的短路电流最大; (各图 b 分流分析)

$$I_7、I_9 = 0.44I_A + 0.81I_B + 0.4I_C + 0.22I_D = 11.49 \text{ kA};$$

(5) 目前柱上负荷开关最大开断容量 16kA、25kA, 短路电流没有超出开关容量限值;

(6) 负荷电流的分配、流动路径分析归纳 (见图 10、11), 从两种负荷分配情况图示中可知, 各电源提供的负荷电流是相同的。负荷电流在线路中的分配是阻抗小的线路段负荷电流大, 反之负荷电流较小。

在负荷分配二种情况的图示中, $I=433\text{A}$ 线路段电抗值为 $0.1 \sim 0.3\Omega$, 如: $I_9=433\text{A}$ 线路段, 电抗值只有 0.1Ω , 而 $I=144\text{A}$ 的线路段电抗值为 0.5Ω , 显示出就近提供电能规律的优越性, 对电能损耗的降低十分有利;

(7) 电能、电压损耗分析:

负荷分配第一种情况时的电能、电压损耗 (见图 12)

单元网全年电能损耗:

$$\Delta W = 396891.72 \text{ kW} \cdot \text{h} = 39.7 \text{ 万 kWh};$$

单元网最大电压损耗:

$$\Delta U_{AC}\% = 108 / 10000 \times 100\% = 1.08\%;$$

负荷分配第二种情况时的电能、电压损耗 (见图 13)

单元网全年电能损耗:

$$\Delta W = 445131.72 \text{ kW} \cdot \text{h} = 44.5 \text{ 万 kWh};$$

单元网最大电压损耗:

$$\Delta U_{AC}\% = 152 / 10000 \times 100\% = 1.52\%;$$

负荷相同, 但分成两条单线路 (目前的供电线路方式) 供电时的, 电能、电压损耗 (见图 14)

全年电能损耗:

$$\Delta W = 2282127.804 \text{ kW} \cdot \text{h} = 228.2 \text{ 万 kWh};$$

最大电压损耗: $\Delta U_{AC}\% = 562 / 10000 \times 100\% = 5.62\%$, 电压损耗 > 5% 允许范围。

比较上述三对数据得:

单元网的电能损耗, 是普通单线形式电能损耗的 $1/5$; 即: $44.5 \text{ 万 kWh} / 228.2 \text{ 万 kWh} \approx 1/5$;

单元网的电压损耗, 是普通单线型式电压损耗的 $1/3.7$; 即: $152\text{V} / 562\text{V} \approx 1/3.7$;

(8) 平衡电流 (环流) 分析:

对于 10kV 系统并联运行的回流问题, 主要表现在各变电所母线间的电压差, 若电压差在两位数以上时, 平衡电流是较大的, 足以影响各个主变的出力。

因为, 两个电源 (见图 9) 之间的阻抗是很小的, 总电抗只有 0.25Ω , 计入电阻时也只是略有增加, 所以变电所母线间的电压差控制是关键。

目前我公司已采用标准化设计原则, 配网上级变电所的主变型号正在统一, 并配备 VQC 电压自动调节装置, 可以将母线电压控制在要求范围内, 所以在容量、电压、短路阻抗相等, 符合并列运行条件时, 平衡电流是很小的。

5 综合评价

(1) “扁日型”单元网结线, 使 10kV 及以下用户都可以有双电源供电。因为每段线路都可看作是相对独立的电源, 有效地提高了供电可靠率, 弥补了手拉手线路容量空闲、利用率不高的状况, 免去

了为用户提供备用电源而闲置的线路容量。接线简单、可靠，运行灵活；

(2) 电能损耗大幅降低。单元网与用两条目前的单线路供同样负荷 20000kVA 时(图 14)每年减少电能损耗达 183.7 万 kWh，以 0.6 元/kWh 计，可增加收入 110 万元，比例： $\approx 1/5$ ；

(3) 电压损耗下降明显。单元网中的最大电压损耗为 152V，用两条目前的单线形式供相同负荷 20000kVA 时(图 14)的最大电压损耗为 562V。比例： $\approx 1/3.7$ ；

(4) 负荷电流的分配与流动路径优化。对降低电能、电压损耗十分有利，显示出就近提供电能规律的优越性。电能质量、供电可靠率、线路利用率、经济效益明显提高；

(5) 容量大、电能质量好。由于单元结构接入的电源线路多，因此对负荷在一定量内的增、减感觉不敏感，电压降很小，电压稳定；

(6) 单元网是在原有线路基础上改接而成的，工程量小。适应城市电缆线路的应用，符合城市规划要求；

(7) 对于架空线路，高空作业大大减少。因为用户电源均由开闭所或配电所供给，线路接入点很少，对于架空线路(包括电缆线路)的管理、检修和抢修十分有利；

(8) 对于差动保护来说，各断路器均需配置差动保护和信号传输光缆，一次性投资费用较大。但从长远利益看，当配电网各项功能得到加强，供电可靠率、线路利用率提高，线路损耗大幅下降。使售、供电量增加，而且是长期的，提高的经济收

入弥补增加的投资是富足有余的。

(9) 短路容量增大，但极限情况下仍在容许范围内。因为在实际运用中接入电源的极限是四个，一般接入二至三个电源，短路电流便可减少 $2/4$ 或 $1/4$ ；

(10) 单元网运行，变电所母线间的平衡电流是关键点，主要表现在母线间的电压差值，虽然 VQC 电压自动调节装置，可以在一定范围内调节母线电压，但还不能满足单元网 10V 以内的高要求，需要“无级主变有载分接开关”并结合智能技术进行自动采集、分析判断，配合 VQC 装置进行自动调整母线电压。

如若目前无“无级主变有载分接开关”则可以采用同母线的线路为单元网提供电源线路，以解决环流问题，但可靠性降低。

由上所述，城市配电网优化单元结构是可行的。

参考文献：

- [1] 赵遵廉,舒印彪,郭国川.电力系统安全稳定导则[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [2] 王振声,王玉卿.35~6/0.4kV 配变电系统短路电流计算实用手册[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 陈章潮.城市电网规划与改造[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

作者简介：

袁北勇(1955-)男，江苏无锡人，工程师，从事配电线路的检修、运行和施工管理。