

Line Loss Calculation and Loss Reduction Analysis of Distribution Network

Xiufang Gu¹, Huaide Wang^{1,2}, Shoutao Tian³, Wenjie Zhai⁴, Xu Zhang⁴

¹Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia

²State Grid Xinjiang Training Center, Urumqi Xinjiang

³State Grid Xinjiang Economic and Technical Research Institute, Urumqi Xinjiang

⁴Wuhai Electric Power Bureau, Wuhai Inner Mongolia

Email: 1142418500@qq.com, 893761219@qq.com

Received: Jun. 29th, 2018; accepted: Jul. 17th, 2018; published: Aug. 6th, 2018

Abstract

In this paper, firstly, the calculation method of the line loss of the distribution network is deduced from the point of view of the load on the basis of the cyclic current method by using the data collected by GPRS. The load three-phase unbalanced characteristics of the distribution network are considered, and the relationship between the law of the line loss and the load is further studied. Secondly, using the method of allocation of losses, the distribution coefficient of network loss for each load of distribution network and the amount of losses that should be allocated to each load are deduced. Finally, the factors that influence the line loss are compared from several aspects. The sensitivity of each line loss factors to the total loss of distribution network is determined by sensitivity analysis method. At last, a set of loss reduction measures are established, and it is proved to be reasonable and effective by examples verification and comparison.

Keywords

Distribution Network, Line Loss, Three-Phase Imbalance, Loss Allocation, Loss Reduction Measures

配电网线损计算与降损分析

顾秀芳¹, 王怀德², 田寿涛³, 翟文杰⁴, 张旭⁴

¹内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特

²国网新疆电力公司培训中心, 新疆 乌鲁木齐

³国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐

⁴乌海电业局, 内蒙古 乌海

Email: 1142418500@qq.com, 893761219@qq.com

收稿日期: 2018年6月29日; 录用日期: 2018年7月17日; 发布日期: 2018年8月6日

摘要

本文以回路电流法为基础,运用GPRS采集到的数据,从负荷的角度推导出配电网线损计算方法,考虑了配电网实际运行时的三相不平衡特性,研究了线损组成的规律与负荷之间的关系;其次运用网损分摊方法推导出配电网各个负荷的网损分摊系数及各个负荷应该分摊的损耗;最后从多个角度对影响线损的因素进行了比较,运用灵敏度分析方法,确定各线损影响因素对配电网总损耗的敏感程度,最终制定了一组降损措施,通过算例验证和对比,证明其是合理有效的。

关键词

配电网, 线损, 三相不平衡, 网损分摊, 降损措施

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

配电网线损是电网线损的主要组成部分。准确计算线损是供电部门确定运行方式、网络技术改造及设备维修的重要依据。配电网直接与大量负荷相连,负荷的随机性和时变性对配电网线损有较大影响,所以未来有必要从负荷的角度研究配电网线损的计算和降损方法[1] [2] [3] [4] [5]。

配电网理论线损计算方法因采集数据方式的不同而有所不同,归纳起来有以下几种:1) 采用变电站出线的电气量数据的传统计算方法[5] [6],包括均方根电流法、平均电流法(形状系数法)、最大负荷损耗时间法,损失因素法、电量法等。这些方法的计算模型和处理方式简单,功率损耗计算不具有时域特性,且误差和工作量较大。2) 采用 FTU/TTU 数据的线损计算方法[7] [8],包括两种,一种计算思路是按各区内实际统计的负荷形状系数进行负荷数据归算,得到用于实际计算的节点等效负荷,实现了按区段、支路统计线损。另一种是将出线 FTU 与其它 FTU 或 TTU 构成回路,利用电路关系计算每个回路的损耗。此计算方法简单、方便,不需要网络参数和拓扑结构分析,但是不便于直接分析负荷变化与线损之间的关系。3) 借助于 GPRS 系统实时传送海量配变运行数据的线损计算方法,该系统完全可以代表电力系统运行状态(包括各种运行曲线),为准确计算 10 kV 配电网理论线损提供了可靠、实时的运行数据资源[9] [10]。这些方法均结合 GPRS 数据实现了线损的快速计算,但是计算结果仍然不能直接用来分析负荷变化与线损的关系。

本文将回路电流法应用到 GPRS 数据采集条件下的配电网线损计算中,力求实现计及负荷特性的系统性的线损计算方法,以此从负荷角度制定综合的降损措施,为负荷侧管理实现降损提供理论分析基础。文中也将对不同线损计算方法中负荷产生的交叉损耗的分摊问题进行探讨,以论证不同方法之间的联系。

2. 考虑负荷特性配电网线损计算方法

本节将从 GPRS 数据采集系统出发研究线损计算的新方法,重点解决从负荷的角度讨论线损计算的方法。

2.1. 配电网三相不平衡线损计算

三相系统不平衡在配电网中普遍存在,如果不考虑此因素会给线损计算带来较大误差,因而有必要

研究不平衡条件下的线损计算。

文献[11]研究了在损耗计算中考虑负荷不平衡性的方法,得到三相不平衡负荷的功率等于三序功率之和的三倍,即

$$\tilde{S} = 3P_1 + 3jQ_1 + 3P_2 + 3jQ_2 + 3P_0 + 3jQ_0 \tag{1}$$

由于能量等于功率乘以时间,将此结论扩展到整个配电系统,则配电网线损计算可用在一定时间内三序网线损之和的3倍来代替。文献[11][12]介绍了由不对称三相电压幅值、电流幅值和功率因数求取其电压、电流相量的计算方法,运用对称分量法求出电压、电流的三序分量,为统一处理变压器和线路损耗,将分解后的低压侧电压、电流按照变压器变比换算到高压侧。

由于配电变压器连接方式为 Yyn0 或 Yd,所以在 10 kV 配网高压侧无零序电流,因此整个配电网中的损耗包括变压器三序损耗及线路正、负序损耗。同时各序对称,因而可以将三相不平衡系统转换为平衡系统,运用单相回路进行计算。

2.2. 配电网回路电流法损耗计算

由于在 10 kV 辐射型配电网的等值电路中,线路对地充电功率很小,所以忽略不计。本文的线损计算分析在 10 kV 高压侧等值电路范围内讨论,如图 1 所示,设各负荷通过分支线路接入配电网主干线, T_i 为理想变压器,折算到高压侧的变压器阻抗为 Z_{Ti} 。变压器导纳支路流过电流很小,等值电路中忽略不计,其损耗近似按不变铁损考虑。

图 1 中各负荷与电源节点构成四个回路,回路电流为各负荷电流。在文献[8]回路电流法的基础上,任取某一编号为 i 回路,其功率损耗为

$$\Delta \tilde{S}_i = d\dot{U}_i \cdot \dot{I}_i^* \tag{2}$$

其中 $d\dot{U} = \dot{U}_0 - \dot{U}_{Ti}$ 。则当配电网含有 m 个负荷时,全网总的功率损耗为[13]

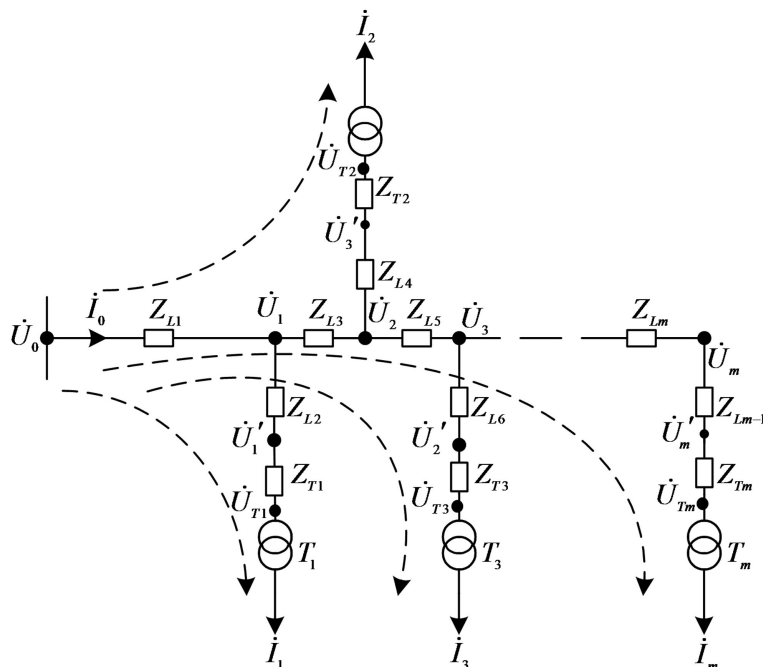


Figure 1. Equivalent circuit of 10 kV distribution network

图 1. 10 kV 配电网等值电路

$$\Delta\tilde{S}_\Sigma = \sum_{i=1}^m \Delta\tilde{S}_i = \sum_{i=1}^m d\dot{U}_i \cdot \dot{I}_i^* = \sum_{i=1}^m (\dot{U}_0 - \dot{U}_{Ti}) \cdot \dot{I}_i^* \quad (3)$$

根据图示电路关系, $d\dot{U}$ 也可表示为

$$d\dot{U} = \dot{U}_0 - \dot{U}'_i + \Delta\dot{U}_{Ti} \quad (4)$$

其中 $\dot{U}_0 - \Delta\dot{U}'_i$ 为线路压降, $\Delta\dot{U}_{Ti}$ 为变压器电压降落。将上述关系代入式(3), 得

$$\Delta\tilde{S}_\Sigma = \sum_{i=1}^m \dot{U}_0 \dot{I}_i^* - \sum_{i=1}^m \dot{U}'_i \dot{I}_i^* + \sum_{i=1}^m \Delta\dot{U}_{Ti} \dot{I}_i^* \quad (5)$$

其中 $\sum_{i=1}^m \dot{U}_0 \dot{I}_i^* = \dot{U}_0 \dot{I}_0^*$ 。正、负序损耗均可按上述方法计算而得。由式(5)可知, 总损耗由三部分组成

- 1) $\dot{U}_0 \dot{I}_0^*$ 为配电网首端功率, 其有功功率为 $U_0 I_0 \cos \varphi$, 由首端测量数据计算可得。
- 2) $-\sum_{i=1}^m \dot{U}'_i \dot{I}_i^*$ 流入变压器高压侧的功率, 与节点电压 \dot{U}'_i 有关。
- 3) $\sum_{i=1}^m \Delta\dot{U}_{Ti} \dot{I}_i^*$ 为变压器阻抗中的功率损耗

$$\sum_{i=1}^m \Delta\dot{U}_{Ti} \dot{I}_i^* = \sum_{i=1}^m I_i^2 R_{Ti} \quad (6)$$

由以上分析可得: (1)、(3)两项功率可由测量的负荷数据和网络参数直接计算得到, 而第二项中含有节点电压 \dot{U}'_i , 不是负荷数据的形式, 需要进一步将节点电压方程 $\mathbf{U} = \mathbf{Z}\mathbf{I}$ 代入式(5)。损耗 $\Delta\tilde{S}_\Sigma$ 第二项

$\Delta\tilde{S}_2 = -\sum_{i=1}^m \dot{U}'_i \dot{I}_i^*$ 表示为

$$\Delta\tilde{S}_2 = \sum_{i=1}^m (Z_{i1} \dot{I}_1 + Z_{i2} \dot{I}_2 + Z_{i3} \dot{I}_3 + \cdots + Z_{im} \dot{I}_m) \dot{I}_i^* \quad (7)$$

这里选定源节点电压 \dot{U}_0 为参考节点, 节点阻抗矩阵 \mathbf{Z} 由支路追加法求解。其中电流 \mathbf{I} 为注入电流, 数值为负荷电流的负值, 由此可得式(5)第一项为零。将方程整理, 提取实部, 得与 $\Delta\tilde{S}_2$ 对应的有功损耗为

$$\Delta P_2 = \sum_{i=1}^m R_{ii} I_i^2 + \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1, j>i}^m 2R_{ij} I_i I_j \cos \varphi_{ij} \right) \quad (8)$$

其中 $\dot{I}_i = I_i \angle \varphi_i$, $\dot{I}_j = I_j \angle \varphi_j$, φ_{ij} 为电流相量 \dot{I}_i 和 \dot{I}_j 的相角差, 即 $\varphi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j$ 。式(8)表明, 负荷 i 产生的损耗包括两部分, 第一部分为负荷 i 单独产生的损耗 $R_{ii} I_i^2$, 第二部分为负荷 i 和 j 产生的交叉项损耗。为进一步明确各负荷的损耗, 有必要求取在交叉项损耗中负荷 i 、 j 各自应分摊或承担的损耗。

结合式(5)及式(8), 得配电网有功总损耗为

$$\Delta P_\Sigma = \sum_{i=1}^n \Delta P_i = \sum_{i=1}^m R_{ii} I_i^2 + \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1, j>i}^m 2R_{ij} I_i I_j \cos \varphi_{ij} \right) + \sum_{i=1}^m I_i^2 R_{Ti} \quad (9)$$

式中出现的 R_{ii} 和 R_{ij} 为节点阻抗矩阵 \mathbf{Z} 中的自阻抗、互阻抗元素。

2.3. 配电网损耗分摊方法和分摊系数的确定

由式(8)可知, 对任意两个负荷 i 、 j 产生的交叉相损耗为

$$\Delta P_{ij} = 2R_{ij} I_i I_j \cos \varphi_{ij} = 2R_{ij} I_i I_j \cos(\varphi_i - \varphi_j) \quad (10)$$

为进一步分析交叉项损耗, 经过推导, 式(9)可写为

$$\Delta P_{ij} = \frac{2R_{ij}P'_iP'_j}{U_0^2} + \frac{2R_{ij}Q'_iQ'_j}{U_0^2} = \Delta P_p + \Delta P_Q \quad (11)$$

图 2 为与式(10)对应的两负荷供电网络。

其中 U_0 为任意两负荷的上游公共节点电压， ΔP_p 、 ΔP_Q 指负荷 i 、 j 的有功、无功在共同流过的干线上产生的交叉项损耗，式(10)等效于图 2 电路所表示的关系。

由文献[14]定义分摊系数

$$K_{P_i} = \frac{P'_i}{P'_i + P'_j}, \quad K_{Q_i} = \frac{Q'_i}{Q'_i + Q'_j} \quad (12)$$

则用户 i 在交叉项中应分摊的有功功率损耗 $\Delta P^{(1)}$ 为

$$\Delta P^{(1)} = 2 \frac{R}{U^2} P'_i P'_j \frac{P'_i}{P'_i + P'_j} + 2 \frac{R}{U^2} Q'_i Q'_j \frac{Q'_i}{Q'_i + Q'_j} \quad (13)$$

进而可以得到由负荷 i 在线路上产生的有功损耗为

$$\Delta P_1 = \Delta P_{P_i} + \Delta P_{Q_i} + \left(2 \frac{R}{U^2} P'_i P'_j \frac{P'_i}{P'_i + P'_j} + 2 \frac{R}{U^2} Q'_i Q'_j \frac{Q'_i}{Q'_i + Q'_j} \right) \quad (14)$$

同理可得负荷 j 应分摊有功功率损耗 $\Delta P^{(2)}$ 和由负荷 j 在线路上产生的总有功损耗 ΔP_2 。

图 3 用来求取值并输出结果，其中 ΔP_{ij} 为负荷 i 与 j 产生交叉项损耗中负荷 i 应该分摊的损耗，然后再求取负荷 i 与所有其它负荷产生交叉项损耗中负荷 i 应该分摊的损耗之和 $P_i^{(3)}$ 。

由分析可见，在配电网中，为求两负荷的交叉项损耗，需要求取两负荷 i 、 j 从公共节点 0 流出的功率 \tilde{S}'_i 、 \tilde{S}'_j 。任一带有分支的配电网如图 4 所示，其中 s 为电源节点。由图 4 可知，为求取分支下游 i 、 j 负荷产生的损耗，首先求公共节点 0 的电压，然后根据潮流分布规律，考虑功率损耗后，得两负荷的功率为

$$\tilde{S}'_i = \tilde{S}_i + \Delta \tilde{S}_{od}, \quad \tilde{S}'_j = \tilde{S}_j + \Delta \tilde{S}_{oc} \quad (15)$$

接下来求取损耗分摊系数以及各负荷所产生损耗与前述方法类似，但是也需注意，任一回路负荷电流独立产生的损耗项仍按 $R_{ii}I_i^2$ 来计算。

为清晰起见，将本章计算负荷产生的损耗的过程归纳为以下步骤：

- 1) 采集配电变压器低压侧 GPRS 三相负荷数据 $U, I, P, Q, \cos \varphi$ ；
- 2) 由配变低压侧三相电压 U 、电流值 I 及 $\cos \varphi$ ，求解相量 \dot{U} 、 \dot{i} ，再采用对称分量法，将它们分解为三序分量，并按变比 k 折算到高压侧；
- 3) 计算网络节点阻抗矩阵 Z ，得到自阻抗 Z_{ii} 和互阻抗 Z_{ij} ；
- 4) 按式(8)第一项计算负荷独立产生的损耗；
- 5) 按式(14)计算任意两负荷到公共节点的功率损耗，计算两负荷的交叉项损耗及分摊系数，由此得

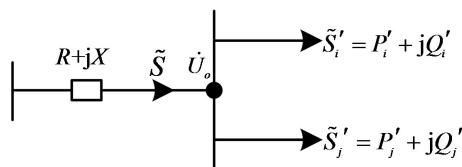


Figure 2. Supply network with two loads
图 2. 含两负荷供电网络

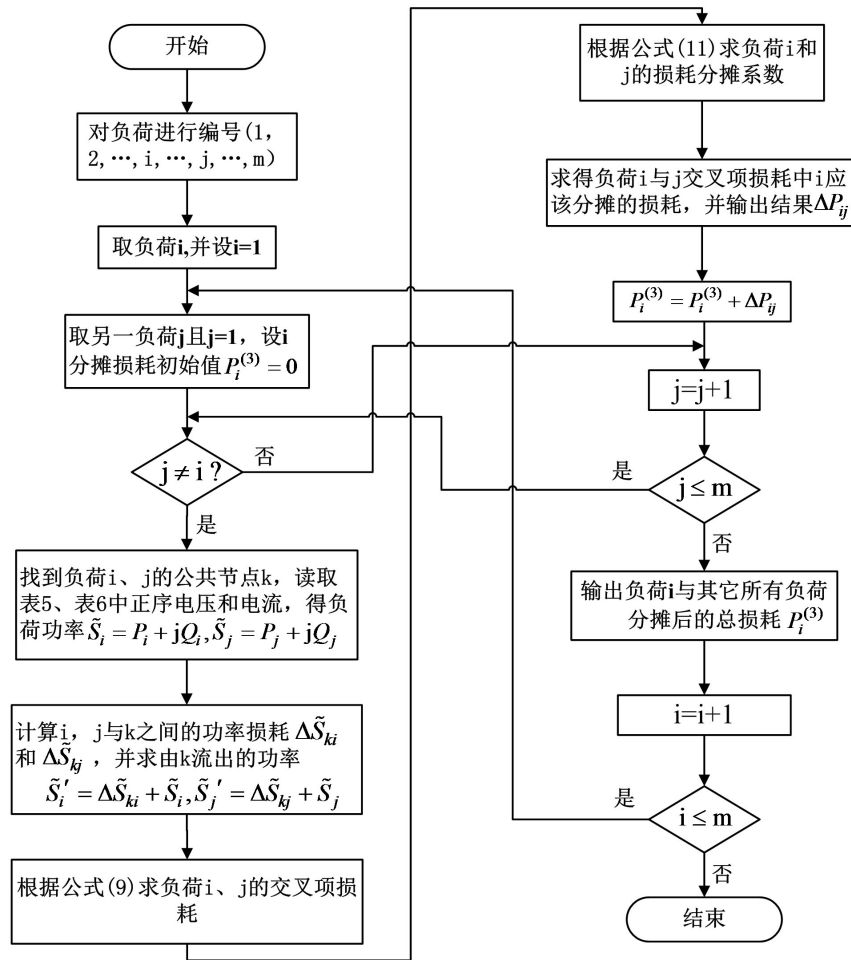


Figure 3. Program flow chart of cross term positive sequence loss
图 3. 正序交叉项损耗计算流程图

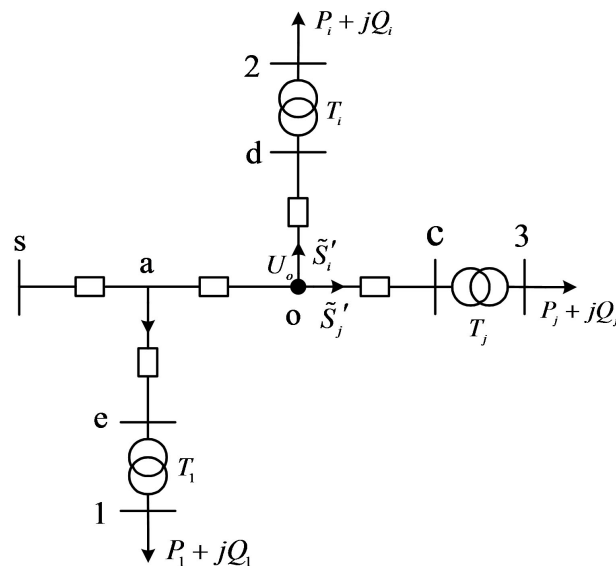


Figure 4. Power supply network with two loads
图 4. 含两负荷供电网络

到任一负荷与其它所有负荷分摊的交叉项损耗之和;

6) 按式(6)计算负荷在变压器绕组中产生的损耗,按不变损耗统计其励磁支路的损耗,最后统计此负荷在变压器中的总损耗;

7) 计算各负荷在网络中产生的总损耗及网络总损耗,统计各负荷损耗所占比例。

3. 10 kV 配电网线损实例计算

本文选取如图 5 所示 9 节点 10 kV 配电网作为算例对象。网络含 8 个负荷,变压器采用 Yyn0 连接方式,节点 0 为电源节点。

3.1. 实例原始数据

线路、配电变压器参数如表 1、表 2 所示。

本文运用 Matlab 仿真得到一组原始数据,用以模拟 GPRS 数据采集系统采集到的数据。电源节点 0 处 RTU 采集到的线路首端各相电压、电流如表 3 所示。

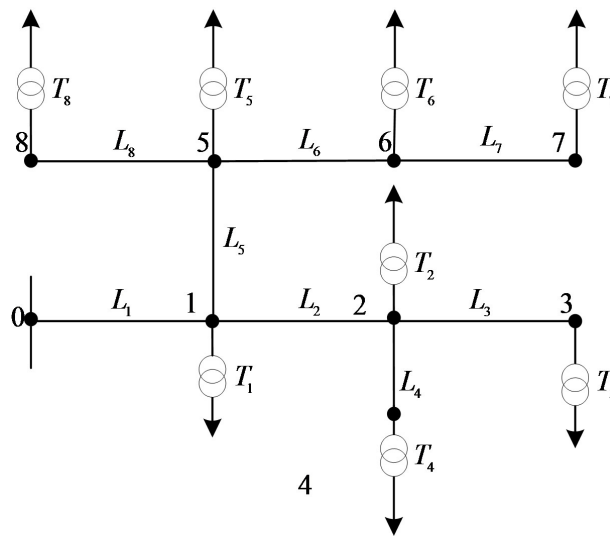


Figure 5. Diagram of distribution network connection
图 5. 配电网接线示意图

Table 1. Line parameters
表 1. 线路参数

名称	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8
型号	LGJ-70	LGJ-50	LGJ-50	LGJ-50	LGJ-50	LGJ-50	LGJ-50	LGJ-50
长度/km	1.836	1.799	0.843	1.623	1.805	0.816	1.793	0.832
电阻/ Ω	0.8262	1.1334	0.5311	1.0225	1.1371	0.5141	1.1296	0.5242
电抗/ Ω	0.6756	0.6818	0.3195	0.6185	0.6841	0.3093	0.6795	0.3153

Table 2. Parameter of distribution transformer
表 2. 配电变压器参数

名称	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
型号	S9-315	S9-400	S9-200	S9-315	S9-315	S9-315	S9-400	S9-315

各配电变压器低压侧三相有功 P 、无功 Q 、电压 U 、电流 I 及功率因数 $\cos\phi$ 如表 4、表 5 所示，其中三相功率对应的负荷采用恒阻抗模型，表中的数据为额定相电压 220 V 下的功率。

从表 4、表 5 可以读取配电变压器低压侧电压、电流、功率因数，文献[7]实现了从这些实测数据到相量值的计算，得电压、电流的相角如表 6 所示。

由上节理论分析，运用对称分量法将配电变压器低压侧负荷电流、电压进行三序分解，同时按照配电变压器变比将电流、电压折算到高压侧。配电网线损包括 10 kV 线路、配变上的正、负序损耗和配电变压器低压侧的零序损耗三部分。由于本文要求 10 kV 配电网的有功损耗，运用支路追加法，略掉阻抗矩阵元素中的虚部元素，得到节点阻抗矩阵为

Table 3. Phase voltage and current of the line head

表 3. 线路首端各相电压和电流

源节点	U/kV			$\phi_U/^\circ$			I/A			$\phi_I/^\circ$		
	电压	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相
U_0	5.729	5.690	5.703	-4.19	-124.28	116.10	110.46	116.39	109.66	-34.10	-156.65	81.76

Table 4. Three-phase power operating parameters of 220 V at LV side of transformer

表 4. 变压器低压侧 220 V 下三相功率运行参数

变压 器名	P/kW			Q/kVar			$\cos\phi$		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
T1	65.38	85.02	74.53	30.94	50.12	38.03	0.90	0.86	0.89
T2	85.33	195.85	88	45.83	55.58	47.45	0.89	0.87	0.88
T3	49.05	54.30	48.80	26.59	31.23	25.09	0.88	0.87	0.88
T4	61.86	59.62	64.10	60.06	58.91	63.19	0.72	0.71	0.71
T5	75.38	81.02	73.53	41.12	45.60	39.03	0.87	0.87	0.88
T6	56.45	67.58	57.05	33.96	44.64	34.46	0.86	0.83	0.86
T7	76.12	82.56	72.52	40.35	43.72	40.28	0.88	0.88	0.87
T8	46.89	57.19	47.48	23.06	34.18	24.28	0.87	0.86	0.89

Table 5. Three-phase transformer actual operating current and voltage amplitude at LV side amplitude

表 5. 变压器低压侧实际运行三相电流、电压幅值

变压 器名	I/A			U/V		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
T1	358.99	410.13	370.04	240.22	201.13	214.05
T2	450.91	472.43	447.64	225.32	206.37	216.46
T3	255.22	263.61	246.62	221.58	204.65	218.23
T4	383.20	375.44	388.22	215.11	216.80	208.75
T5	389.85	394.83	378.50	218.74	206.07	220.06
T6	308.42	332.70	302.44	228.26	199.58	218.10
T7	385.34	400.61	377.77	216.48	207.55	220.41
T8	249.89	273.03	241.10	232.08	198.68	220.21

$$R_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 \\ 0.8262 & 1.9596 & 1.9596 & 1.9596 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 \\ 0.8262 & 1.9596 & 2.4907 & 1.9596 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 \\ 0.8262 & 1.9596 & 1.9596 & 2.9821 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 \\ 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 1.9633 & 1.9633 & 1.9633 & 1.9633 \\ 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 1.9633 & 2.4774 & 2.4774 & 1.9633 \\ 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 1.9633 & 2.4774 & 3.607 & 1.9633 \\ 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 0.8262 & 1.9633 & 1.9633 & 1.9633 & 2.4875 \end{bmatrix}$$

上述矩阵是以电源节点 0 为参考节点，所以式(15)中第一项损耗为零，损耗从第二项开始算起。

3.2. 负荷产生正、负序损耗的计算

负荷在配网中产生的正序和负序总损耗见表 7。

3.3. 配电变压器导纳损耗的计算

变压器导纳损耗包括正序、负序与零序损耗，由于 10 kV 线路中电压变化范围不大，因此，各配电变压器的导纳损耗数值变化也不大，本文以统计的形式给出其损耗值，如表 8 所示。

综合上面的计算过程，可以求出整个 10 kV 配电网的线损，如表 9 所示。

因此，整个 10 kV 配电网的总损耗 $\Delta P_{\Sigma} = 3 \times \sum_{i=1}^8 \Delta P_i = 72.09 \text{ kW}$ 。求取第三章算例中原始数据下的首端功率和末端功率，两者作差，得配电网线损值为 67.911 kW，与算例中求得 72.09 kW 相差不大，误差为 6.15%，误差的主要原因来源于变压器导纳励磁支路的损耗。

Table 6. Three-phase transformer actual operating current and voltage angle at LV side
表 6. 变压器低压侧实际运行三相电流、电压相角

变压 器名	$\varphi_{I_i}/^\circ$			$\varphi_{U_i}/^\circ$		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
T1	-29.58	-152.53	81.17	-4.26	-122.01	109.00
T2	-32.70	-154.76	83.87	-4.46	-124.65	112.17
T3	-32.32	-155.58	84.34	-4.11	-125.62	112.41
T4	-50.79	-169.25	70.97	-6.63	-124.59	115.56
T5	-33.15	-155.48	85.03	-4.06	-126.36	112.99
T6	-33.85	-157.71	80.16	-3.20	-124.19	111.02
T7	-31.85	-154.43	84.83	-3.92	-126.53	113.88
T8	-29.36	-154.67	83.11	-2.67	-123.71	110.52

Table 7. Positive and negative sequence loss of each load in distribution network (W)
表 7. 各负荷在变压器中的正序和负序损耗(W)

负荷	1	2	3	4	5	6	7	8
正序损耗	2246.66	3737.96	1891.98	3219.38	3117.92	2540.52	3622.10	1726.31
负序损耗	10.54	2.69	0.84	4.11	1.67	7.02	3.91	7.14

4. 线损措施的制定

按负荷所分摊的损耗大小顺序进行排序,按照理论分析,选取的线损因素包括:有功功率、三相电流不平衡度、电气距离、功率因数 $\cos\varphi$ 。三相不平衡度为电流负序分量与正序分量比值的百分比。表征负荷位置的参数用从源节点0到相应负荷自阻抗的电阻来衡量,称为电气距离。

本文借鉴灵敏度方法,来分析当这些影响因素改变时,对线损影响程度的大小,以此作为有效的降损措施。选取表9中前四个线损占比13.95%及以上的负荷,根据文献[15],运用归一化思想计算灵敏度:

$$\bar{S}_x^T = \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{x}{T} = \frac{\partial T/T}{\partial x/x} \quad (16)$$

以各自初始状态的值为基准,计算结果如表10所示。

选取灵敏度较大的四个作为降损措施,即降低负荷7、2的负荷,增大负荷7、2的功率因数。

为验证有效性,作为对照组,选取灵敏度值由大到小排第5到8的因素作为另一组降损措施。对第一组、第二组各措施变化相同量,来求取两组综合措施下的线损,计算结果如表11所示。

Table 8. Admittance loss of distribution transformer (W)

表 8. 配电变压器导纳损耗(W)

负荷	1	2	3	4
损耗值	233.35	280	166.67	233.35
负荷	5	6	7	8
损耗值	233.35	233.35	280	233.35

Table 9. Total loss of distribution network of each load (W)

表 9. 电网各负荷总损耗(W)

负荷	1	2	3	4	5	6	7	8
正序损耗	2246.66	3737.96	1891.98	3219.38	3117.92	2540.52	3622.10	1726.31
负序损耗	10.54	2.69	0.84	4.11	1.67	7.02	3.91	7.14
损耗值	233.35	280	166.67	233.35	233.35	233.35	280	233.35
总损耗	2490.55	4020.65	2059.49	3456.84	3352.94	2780.37	3906.01	1966.8

Table 10. Sensitivity of each load line loss factor

表 10. 各负荷线损影响因素灵敏度

负荷编号	负荷 P	三相不平衡度	电气距离	功率因数
2	0.3614	0.0042	0.1499	0.2344
7	0.3681	0.0017	0.0342	0.2403
4	0.1559	0.0044	0.0279	0.1788
5	0.2104	0.0166	0.2294	0.2102

Table 11. Distribution network loss under the reduced losses

表 11. 降损措施下的配电网损耗

降损措施	总损耗(kW)	损耗下降值(kW)	损耗下降百分比
第一组	67.248	0.664	0.98%
第二组	67.329	0.582	0.86%

由表中数据可以明显看出, 第一组措施对降低配电网损耗更为有效, 可以更多地降低整个配电网产生的损耗, 由此验证所制定的措施是有效的。

5. 结语

关于本文将 GPRS 负荷数据作为数据来源, 重点研究了用负荷数据表达的配电网线损计算方法, 提出了面向负荷管理的降损措施。主要内容包括:

1) 从配电网运行特点出发, 采用对称分量法考虑了负荷的不平衡性。以回路电流法为基础, 进一步推导了以负荷运行参数表达的配电网线损计算公式, 明确了线损组成及含义, 解释了线损组成规律及与各负荷的关系; 论证了线损不同计算方法之间的相关性;

2) 结合配电网的结构特点, 确定了各负荷在线损交叉项损耗中的分摊方法。综合考虑配电网负荷不平衡性及各项损耗, 得到了各负荷在配电网中的总损耗。最后结合算例, 完成对各负荷损耗的计算, 并统计各项损耗;

3) 用灵敏度分析方法从主要因素中确定了有效降损措施, 通过算例验证了方法的有效性。

本文进一步的研究工作可以从以下方面展开:

1) 在更长时间范围内讨论线损与负荷曲线相关因素的关系, 研究用负荷曲线特性参数表达的线损计算方法, 并与传统线损计算方法作对比。

2) 研究以降损指标为目标的各项降损措施的优化, 为降损措施的制定提供更明确的方向。

参考文献

- [1] 党三磊, 李建, 肖勇, 林声宏. 线损与降损措施[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 李少萱. 负荷曲线对形状系数及电能损耗的影响分析[J]. 电力与电工, 1999(2): 8-11.
- [3] 尤宏亮, 姜欣. 负荷方差特性和配电线路中电能损耗关系研究[J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(2): 13-15.
- [4] Wang, X., Fan, H., Han, C., *et al.* (2010) Development of Auxiliary Line Loss Management System in Hebei Grid. *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, 31 August-3 September 2010*, 1-4.
- [5] 何黎. 城乡配电网损耗精细化分析与节能技术研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学(保定), 2011.
- [6] 张巧霞, 畅刚. 配电网线损计算方法及其适用性分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 180-183.
- [7] 朱发国. 基于现场监控终端的配网线损计算[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 38-40.
- [8] 王刚军, 王承民, 等. 基于实测数据的配网理论线损计算方法[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 18-20
- [9] 彭谦, 张弘鲲. 基于集抄系统的配电网潮流计算方法[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 69-72.
- [10] 党世红, 党宏社. 基于 GPRS 的嵌入式远程自动抄表系统设计[J]. 低压电器, 2008(18): 16-20.
- [11] 张粒子, 孟繁玲, 杨镜非, 等. 基于综合测试数据的配电网线损计算[J]. 中国电力, 1998(9): 31-33.
- [12] 张锋, 江道灼, 黄民翔. 基于配电监测数据的 10 kV 配网实时三相线损计算[J]. 继电器, 2003, 31(3): 15-19.
- [13] 冯林桥, 许文玉, 邓昌安, 等. 共轭电流全损耗功率分量定义及其叠加原理[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 65-69.
- [14] 李卫东, 孙辉, 赵善俊. 基于严格数学推导的损耗分摊原则研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(11): 32-35.
- [15] 王尔智, 赵玉环. 电力网络灵敏度分析与潮流计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org