

DOI: 10.7667/PSPC160745

基于过程状态特征化的配电网线损计算

李健¹, 黄俊铭², 朱建全², 庄远灿², 刘明波²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510600; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对配电网的线损计算问题, 提出了一种新的基于过程状态特征化的线损计算方法。首先, 将智能计量终端在某一时间段内采集到的负荷电流进行特征化处理, 在充分反映负荷状态变化特征的同时, 显著减轻通信数据传输和主站数据处理的压力。其次, 根据配电网公用变压器的接线特点, 通过序分量法对其低压侧的三相状态特征电流进行对称分解, 并根据各序电流分量在高、低压侧的相角变化情况计算其高压侧的三相状态特征电流。进一步基于这些状态特征量, 通过分相计算的方法对配电网的线损进行计算, 以解决三相不平衡和分布式电源接入情况下的线损计算问题。最后, 将所提方法在某实际电网进行示范应用, 所得结果证明了其有效性。

关键词: 配电网; 线损计算; 状态特征化; 三相不平衡; 分布式电源

Line loss calculation for distribution network based on state characterization

LI Jian¹, HUANG Junming², ZHU Jianquan², ZHUANG Yuanfan², LIU Mingbo²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A novel real-time line loss calculation method based on state characterization is proposed for calculating the line loss of distribution network. First, the load currents collected by the measuring terminals during a certain period are characterized, such that the change characteristics of electric loads are reflected fully, and the pressure of data transmission and data processing is relieved effectively. Secondly, the characteristic current in the low voltage side of the public distribution transformer is decomposed symmetrically by the sequence component method, then the characteristic current in the other side can be calculated according to the connection way of transformer. Thirdly, based on the state characterizations, the line loss of distribution network is calculated by the split phase calculation method, solving the problems about the three-phase unbalance and the accessing of distributed power generation. Finally, the proposed method is applied to a real distribution network, and the results prove its effectiveness.

This work is supported by China Southern Power Grid Co., Ltd. Science and Technology Program (No. GDKJ00000049).

Key words: distribution network; power loss calculation; state characterization; three-phase unbalance; distributed generation

0 引言

线损率是反映电网运行状况的一项重要技术经济指标。为了更好地对配电网的线损进行管理, 提高其经济性, 有必要对配电网的理论线损进行准确计算^[1-3]。

现阶段的配电网线损计算面临着较多的挑战。一方面, 随着用电负荷的密集增长, 配电网的三相

负荷不对称性加剧^[4]。另一方面, 随着分布式电源的日益增加, 配电网的功率流向将更为复杂多变^[5-6]。这些变化, 使得配电网线损计算更为困难。

目前的配电网线损计算方法还未能很好地满足现阶段的配电网线损精确计算的要求。现有的配电网线损计算方法主要可以归为估算法和潮流法两类^[7-10]。估算法包括均方根电流法、平均电流法、等值电阻法等。这些方法操作简单, 所需的测量数据较少, 但无法反映电力状态的变化过程, 因而计算误差相对较大。此外, 该类方法对配电网三相负荷是否平衡、是否包含分布式电源等情况也未作区

别处理,因而未能适应新形势下的配电网线损计算要求。潮流法可以得到某个时间断面较为精确的线损值,但是配电网的潮流计算相对主网更容易出现收敛性问题。在考虑三相不平衡和分布式电源接入的情况下,配电网的潮流计算的收敛率更低,这也在很大程度上限制了潮流法在新形势下的配电网线损计算上的应用。

近年来,为了更好地观测配电网的运行状态,越来越多的实时测量装置被安装在各个负荷节点,这为线损的精确计算提供了重要条件。在这种情况下,文献[11]基于馈线终端单元(FTU)采集的数据提出了一种在线线损计算方法,较大程度地提高了线损计算的准确性;文献[12-14]同时利用馈线终端单元和配变终端单元(TTU)的数据进行线损计算,也取得了良好的计算结果。但是这两种方法采用逐点计算的方式,需要密集传输大量测量终端的数据到主站进行处理,在配电网的通信网络不够完备的情况下,数据传输和处理的负担过大。文献[15]基于终端数据进行状态估计,进而得到配电网的实时线损,但是该方法仍然存在数据传输负担过大的问题,且配电网的状态估计容易出现不收敛的情况,因而难以在实际配电网中进行推广应用。

广东电网近五年大力推进计量自动化系统,2015年已实现45万只智能计量终端在配电网末端全覆盖。本文基于过程状态特征化的思想提出了一种新的配电网线损计算方法。首先将智能计量终端采集到的数据进行特征化处理,进而利用这些特征量进行配电网线损的分相计算,为配电网三相不平衡、分布式电源接入情况下的线损计算提供了一种新的思路。

1 过程状态特征化的基本定义

随着智能计量终端的发展,配电网的状态数据已经可以实现毫秒级的采集。但是目前配电网的通信设施远不如主网完善,难以满足大量密集采集的数据的传输要求。针对这一问题,有学者提出了面向时间过程的分析方法^[16-19]。

面向时间过程的分析方法的基本思想是通过提炼某个时段内电力系统的变化特征,以表征该时段内电力系统的状态变化情况。假定在给定的时间 T 内,系统运行状态的某一评价指标 Z 可以表示为系统状态变量 $X(t)$ 的泛函形式。

$$Z = \int_0^T f[X(t)]dt \quad (1)$$

且可以找到一个特定的状态变量 \tilde{X} ,使 Z 转化为 \tilde{X} 的函数。

$$Z = T \cdot g(\tilde{X}) \quad (2)$$

则称 \tilde{X} 为 Z 的特征状态变量,其求取过程称为过程状态特征化^[20]。通过过程状态特征化的方式,可以将一个面向时间过程的复杂问题转化为一个面向特征量的相对简单的问题,从而有效降低数据的传输量 and 处理量。

2 线损计算的过程状态特征化

2.1 基于智能计量终端的状态特征电流

配电网的线损可以视为其单位时间内的损耗功率 $\Delta P_{\text{loss}}(t)$ 对时间的积分。

$$\Delta A = \int_0^T \Delta P_{\text{loss}}(t)dt \quad (3)$$

式中, ΔA 为配电网的线损量。

根据过程状态特征化的定义,如果在时间 T 内可以找到一个特定的电流 \tilde{I} ,使它在相同时间内产生的线损与实际线损相等,即

$$\Delta A = T \cdot g(\tilde{I}) \quad (4)$$

式中, $g(\tilde{I})$ 为与时间无关的函数。

则可以用该电流表征配电网在这段时间内的线损变化情况,并将电流 \tilde{I} 称为线损状态特征电流。

根据式(3)和式(4),线损状态特征电流 \tilde{I} 须满足

$$\int_0^T I_t^2 R dt = T \times \tilde{I}^2 \times R \quad (5)$$

由此,可得到线损状态特征电流 \tilde{I} 为

$$\tilde{I} = \sqrt{\int_0^T I_t^2 dt / T} \quad (6)$$

由于目前的智能计量终端大多具有储存和计算功能,可以由这些计量终端就地对负荷电流进行状态特征化处理,再上传至主站进行线损计算,从而减轻大量测量数据传输和集中处理的压力。但是这些计量终端主要安装在负荷侧,只能获取其所在线路分支的状态特征电流。对于上一级干线的状态特征电流,需要由这些线路分支的状态特征电流推导得到。

根据基尔霍夫电流定律,某一干线的电流相量等于其下一级的所有支线的电流相量之和。由于式(6)所描述的线损状态特征电流只包含了电流有效值的信息,未能表征电流相量的情况,故需要进一步构造一个复数形式的状态特征电流。

定义 $I_{p,m}$ 为 m 相电流的实部, $I_{q,m}$ 为 m 相电流的虚部,有

$$\begin{cases} I_{p,m} = I_m \cos \theta_m \\ I_{q,m} = I_m \sin \theta_m \end{cases} \quad m = A, B, C \quad (7)$$

式中: I_m 为 m 相电流幅值; θ_m 为 m 相电流角度。

根据式(6), 分别对三相电流的实部和虚部进行状态特征化处理, 有

$$\begin{cases} \tilde{I}_{p,m} = \text{sign}(\cos \theta_m) \cdot \sqrt{\int_0^T I_{p,m}^2 dt / T} \\ \tilde{I}_{q,m} = \text{sign}(\sin \theta_m) \cdot \sqrt{\int_0^T I_{q,m}^2 dt / T} \end{cases} \quad m = A, B, C \quad (8)$$

式中: $\tilde{I}_{p,m}$ 为线损状态特征电流的实部; $\tilde{I}_{q,m}$ 为线损状态特征电流的虚部。sign 函数用于判断状态特征电流的方向, 从而区分普通负荷和分布式电源的情况, 其中普通负荷支路的状态特征电流为正, 分布式电源支路的状态特征电流为负。

由此可以得到各相电流在某一时段内的复数形式的状态特征电流为

$$\tilde{I}_m = \tilde{I}_{p,m} + j\tilde{I}_{q,m} \quad m = A, B, C \quad (9)$$

将某一时段内各个负荷分支的电流描述为式(9)所示的复数形式的状态特征电流后, 结合基尔霍夫电流定律, 便可推导得到这些负荷分支上层各段线路的状态特征电流。

2.2 变压器高压侧的状态特征电流

配电网的 10 kV/380 V 变压器主要可以分为专用变压器和公用变压器两类。对于专用变压器, 实际现场中一般将计量终端安装在其高压侧。由于本文研究的是 10 kV 配电网的线损计算, 故可直接利用上文得到的状态特征电流计算线损。但对于公用变压器, 计量终端一般安装在其低压侧, 须将其转化为高压侧的状态特征电流, 方可进行线损计算。

采用序分量法对变压器两侧的状态特征电流进行分析。由于配电网的变压器一般采用 D/Y₀ 接法, 零序电流在 10 kV 侧不能流通, 故仅需对其正序和负序电流分量进行计算。对于低压侧的 A 相状态特征电流, 其正序分量和负序分量分别为

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_{A,1} \\ \tilde{I}_{A,2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_A \\ \tilde{I}_B \\ \tilde{I}_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\tilde{I}_{A,1}$, $\tilde{I}_{A,2}$ 分别为 A 相状态特征电流的正序和负序分量; 运算符 $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$ 。

利用上述状态特征电流的各序分量, 结合公用变压器高低压侧的接线形式, 即可求得其高压侧的状态特征电流。以常用的 D/Y₀-11 接法为例, 对于某一相电流, 其低压侧的正序电流的角度比高压侧大 30°, 负序电流的角度比高压侧小 30°, 故有

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_A^h \\ \tilde{I}_B^h \\ \tilde{I}_C^h \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{A,1} & \tilde{I}_{A,2} \\ a^2 \tilde{I}_{A,1} & a \tilde{I}_{A,2} \\ a \tilde{I}_{A,1} & a^2 \tilde{I}_{A,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j30^\circ} \\ e^{-j30^\circ} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: k 为变压器的绕组变比; \tilde{I}_A^h , \tilde{I}_B^h , \tilde{I}_C^h 分别为变压器高压侧的特征电流。

3 配电网线损计算

3.1 输电线路的损耗

通过上述的过程状态特征化方法, 可以得到配电网各段线路的状态特征电流。在此基础上, 便可进一步计算各段线路的损耗。考虑到配电网的三相不平衡情况较为严重, 采用分相计算的方法进行线损计算, 具体为

$$\begin{cases} \Delta W_{LA,i} = \sum_{j=1}^N |\tilde{I}_{A,i,j}|^2 R_{A,i} T \\ \Delta W_{LB,i} = \sum_{j=1}^N |\tilde{I}_{B,i,j}|^2 R_{B,i} T \\ \Delta W_{LC,i} = \sum_{j=1}^N |\tilde{I}_{C,i,j}|^2 R_{C,i} T \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta W_{LA,i}$, $\Delta W_{LB,i}$, $\Delta W_{LC,i}$ 分别为线路 i 的 A, B, C 三相损耗; $R_{A,i}$, $R_{B,i}$, $R_{C,i}$ 为线路 i 的 A, B, C 三相电阻; $\tilde{I}_{A,i,j}$, $\tilde{I}_{B,i,j}$, $\tilde{I}_{C,i,j}$ 分别为线路 i 在 j 时段的 A, B, C 三相状态特征电流; n 为特征化的时段总数; T 为每个时段的时间间隔。

则线路 i 的总损耗即为其三相损耗之和, 具体为

$$\Delta W_{L,i} = \Delta W_{LA,i} + \Delta W_{LB,i} + \Delta W_{LC,i} \quad (13)$$

3.2 变压器的损耗

在三相不平衡的情况下, 公用变的可变损耗可由绕组的三相状态特征电流进行计算, 具体为

$$\Delta W_{Cu,i} = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta P_{f,i}}{3} \times \left[\left(\frac{|\tilde{I}_{A,i,j}|}{I_{N,i}} \right)^2 + \left(\frac{|\tilde{I}_{B,i,j}|}{I_{N,i}} \right)^2 + \left(\frac{|\tilde{I}_{C,i,j}|}{I_{N,i}} \right)^2 \right] T \quad (14)$$

式中: $\Delta W_{Cu,i}$ 为公用变压器 i 的可变损耗; $\Delta P_{f,i}$ 为公用变压器 i 的短路损耗; $I_{N,i}$ 为公用变压器 i 的额定电流的幅值。

公用变压器的固定损耗为

$$\Delta W_{Fe,i} = \Delta P_{0,i} \cdot nT \quad (15)$$

式中: $\Delta W_{Fe,i}$ 为公用变压器 i 的固定损耗; $\Delta P_{0,i}$ 为公用变压器 i 在空载时的损耗。

则公用变压器 i 的总损耗为

$$\Delta W_{T,i} = \Delta W_{Cu,i} + \Delta W_{Fe,i} \quad (16)$$

3.3 配电网的总损耗

配电网的总损耗等于该配电网内所有线路和公用变压器的损耗之和, 具体为

$$\Delta W = \sum_{i=1}^M \Delta W_{L,i} + \sum_{i=1}^N \Delta W_{T,i} \quad (17)$$

式中: M 为配电网内的线路总数; N 为配电网内的公用变总数。

4 算例分析

4.1 算例 1

以东莞市某 10 kV 配电网为示点(示点 1), 对所提线损计算方法的有效性进行验证。具体的网络接线情况见图 1, 线路与变压器的相关参数见附表 A1、A2。其中, T4, T5, T7 为公用变压器, T1, T2, T3, T6, T8, T9 为专用变压器。对于每一台变压器, 均安装一个智能计量终端, 实时测量负荷电流, 并就地地进行特征化处理。其中, 公用变压器安装在低压侧, 专用变压器安装在高压侧, 每个进行特征化的时段的时间间隔为 15 min。各个计量终端的状态特征电流也按 15 min/次的频率上传至主站进行线损计算, 结果如图 2 和表 1—表 3 所示。

图 2 给出了示点 1 在一日内的线损变化曲线。从中可以看出, 示点 1 在上午 11:00 和晚上 19:00 左右出现了两个高峰。这是因为, 该示点的负荷主要以小型加工企业和居民用电为主, 在上午 11:00 和晚上 19:00 左右处于用电高峰, 因而其线损也相应较大。

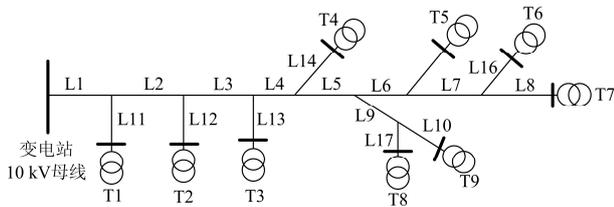


图 1 示点 1 的网接线

Fig. 1 Connection of pilot 1

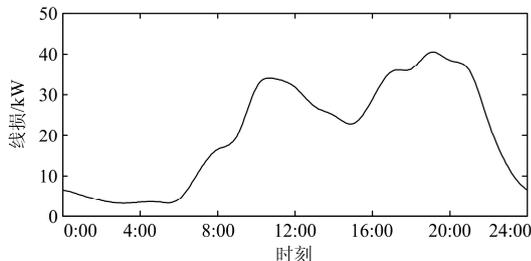


图 2 示点 1 的线损变化曲线

Fig. 2 Line loss curve of pilot 1

表 1 示点 1 的线路损耗

Table 1 Power loss of transmission lines of pilot 1

kW·h					
线路	损耗	线路	损耗	线路	损耗
L1	54.12	L7	1.54	L13	1.01
L2	45.41	L8	0.23	L14	0.89
L3	37.12	L9	1.55	L15	2.79
L4	25.87	L10	0.13	L16	0.55
L5	17.16	L11	0.38	L17	0.78
L6	8.40	L12	0.42	--	--

表 2 示点 1 的公用变压器损耗

Table 2 Power loss of transformers of pilot 1

kW·h			
变压器	可变损耗	固定损耗	总损耗
T4	37.17	42.48	79.65
T5	116.60	50.16	166.76
T7	9.73	41.04	50.77

表 3 各种方法在示点 1 的计算结果对比

Table 3 Comparison of various methods in pilot 1

方法	本文所提方法	统计线损	等值电阻法
线损量/kW·h	495.46	520.72	431.05
线损率(%)	2.54	2.67	2.21

表 1 和表 2 分别给出了示点 1 各段线路和公用变压器的损耗情况。从中可以看出, 由于各段线路的负荷电流差异较大, 其线损也具有较大的差别。各台公用变压器的固定损耗相对较为接近, 其中 T4 与 T7 的固定损耗仅相差 1.44 kW·h。但这些公用变压器的可变损耗差异比较大, T5 与 T7 的可变损耗甚至相差 106.87 kW·h。这主要是由各台公用变压器所带的负荷大小不同引起的。

表 3 为本文所提方法与统计线损以及《中国南方电网线损理论计算技术标准》中基于电量的等值电阻法的计算结果的对比情况。从中可以看出, 本文所提方法的线损计算结果与统计线损较为接近, 它们的线损率的差异仅为 0.13%, 而等值电阻法与这两者的差异都相对较大。这也在一定程度上说明了本文所提方法的准确性。

4.2 算例 2

以东莞市的另一 10 kV 配电网为示点(示点 2), 对含分布式电源情况下本文所提方法的有效性进行验证。示点 2 的网络接线情况见图 3。其中, T1 所在支路接有一台容量为 1250 kW 的小水电, T2, T3, T6, T8 为公用变压器, T4, T5, T7 为专用变压器, 线路与变压器的相关参数见附表 A3、A4。按示点 1 相同的方式安装计量终端, 对电流进行特征化处理,

并上传至主站进行线损计算。

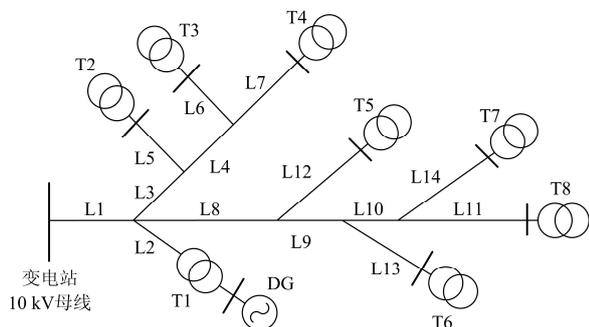


图3 示点2的网络接线

Fig. 3 Connection of pilot 2

图4给出了示点2在一日内的线损变化曲线,表4、表5分别给出了示点2各段线路和公用变压器的损耗情况,表6给出了本文所提方法与统计线损以及等值电阻法的计算结果。这些计算结果表明,本文所提方法同样适用于含分布式电源的配电网的线损计算,并取得较为准确的结果。

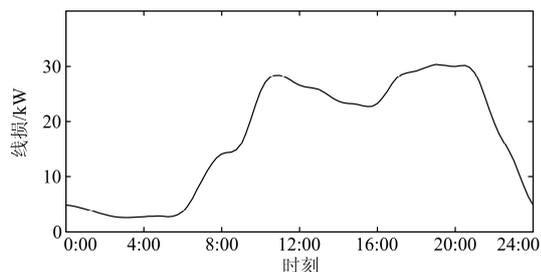


图4 示点2的线损变化曲线

Fig. 4 Line loss curve of pilot 2

表4 示点2的线路损耗

Table 4 Power loss of transmission lines of pilot 2

kW·h					
线路	损耗	线路	损耗	线路	损耗
L1	23.55	L6	0.89	L11	2.44
L2	3.64	L7	1.19	L12	0.66
L3	5.83	L8	18.87	L13	1.15
L4	4.13	L9	12.49	L14	0.81
L5	0.15	L10	6.07	—	—

表5 示点2的公用变压器损耗

Table 5 Power loss of transformers of pilot 2

kW·h			
变压器	可变损耗	固定损耗	总损耗
T2	5.29	16.20	24.49
T3	31.95	41.04	72.99
T6	41.26	42.48	83.76
T8	87.65	50.16	137.81

表6 各种方法在示点2的计算结果对比

Table 6 Comparison of various methods in pilot 2

方法	本文所提方法	统计线损	等值电阻法
线损量/kW·h	397.91	406.78	373.83
线损率/%	3.14	3.21	2.95

5 结语

本文提出了一种基于过程状态特征化的配电网线损计算方法,得到主要结论如下:

(1) 本文所提方法可以充分考虑负荷的状态变化对线损的影响情况,并显著减轻数据传输和处理的压力,相对于传统的方法具有更高的精度。

(2) 本文所提方法可以解决配电网三相不平衡情况下的线损计算问题,并适用于分布式电源接入情况下的线损计算。

(3) 将所提的方法在某实际配电网进行示范应用,所得结果说明了所提方法具有良好的应用效果和推广应用价值。

附录 A

附表 A1 试点1的变压器参数

Table A1 Parameters of transformers of pilot 1

配变编号	配变型号	容量/kVA	用户类型	空载损耗/W	负载损耗/W
T1	SCB10	1000	专用变	1770	8755
T2	SCB10	1000	专用变	1770	8755
T3	SCB10	1000	专用变	1770	8755
T4	SCB10	1000	公用变	1770	8755
T5	SCB10	1250	公用变	2090	9690
T6	SCB9	1250	专用变	2350	10370
T7	SCB9	800	专用变	1710	7360
T8	SCB9	1000	公用变	1990	8610
T9	SCB9	500	专用变	1310	5170

附表 A2 试点1的线路参数

Table A2 Parameters of transmission lines of pilot 1

线路编号	导线型号	线路长度/km
L1	YVJ22-3*300	0.72
L2	YVJ22-3*300	0.68
L3	YVJ22-3*300	0.34
L4	YVJ22-3*300	0.67
L5	YVJ22-3*300	0.16
L6	YVJ22-3*300	0.30
L7	YVJ22-3*300	0.26
L8	YVJ22-3*240	0.37
L9	YVJ22-3*300	0.56
L10	YJV22-3*120	0.21
L11	YVJ22-3*240	0.27
L12	YVJ22-3*240	0.06
L13	YVJ22-3*240	0.15
L14	YVJ22-3*240	0.32
L15	YVJ22-3*240	0.13
L16	YVJ22-3*240	0.2
L17	YVJ22-3*240	0.16

附表 A3 试点 2 的变压器参数

Table A3 Parameters of transformers of pilot 2

配变 编号	配变 型号	容量/ kVA	用户 类型	空载损 耗/W	负载损 耗/W
T1	SCB10	1250	专用变	2090	9690
T2	S11	500	公用变	675	5100
T3	SCB9	800	公用变	1710	7360
T4	SCB10	1000	专用变	1770	5755
T5	S11	800	专用变	980	7500
T6	SCB9	1000	公用变	1770	8755
T7	SCB9	800	专用变	1710	7360
T8	SCB10	1250	公用变	2090	9690

附表 A4 试点 2 的线路参数

Table A4 Parameters of transmission lines of pilot 2

线路编号	导线型号	线路长度/km
L1	YVJ22-3*300	0.68
L2	LGJ-240	3.15
L3	YVJ22-3*300	0.15
L4	YVJ22-3*240	0.31
L5	YVJ22-3*240	0.31
L6	YVJ22-3*300	0.16
L7	YVJ22-3*240	0.18
L8	LGJ-240	0.58
L9	LGJ-240	0.23
L10	YVJ22-3*240	0.24
L11	YVJ22-3*240	0.19
L12	YVJ22-3*120	0.07
L13	YVJ22-3*240	0.15
L14	YVJ22-3*120	0.08

参考文献

[1] 刘健, 段璟靓. 配电网极限线损分析及降损措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 27-35.
LIU Jian, DUAN Jingjing. Line loss limitation analysis and optimal planning of loss reduction for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 27-35.

[2] 陈芳, 张利, 韩学山, 等. 配电网线损概率评估及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 39-44.
CHEN Fang, ZHANG Li, HAN Xueshan, et al. Line loss evaluation and application in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 39-44.

[3] 王李, 王宝, 李泓泽, 等. 配电路年理论线损率及其降损分析[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 50-54.
WANG Li, WANG Bao, LI Hongze, et al. Analysis on annual theoretical line loss rate and loss reduction of distribution line[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 50-54.

[4] 杨期余. 配电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[5] 文旭, 颜伟, 黄淼, 等. 计及绿色能源出力不确定性的输电线损率概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 170-175.
WEN Xu, YAN Wei, HUANG Miao, et al. Probabilistic transmission loss rate evaluation under green energy generation uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 170-175.

[6] 耿晓娜, 刘伟东, 范振亚, 等. 光伏电源与电动汽车充电站在配电网中的选址定容[J]. 陕西电力, 2015, 43(10): 24-29.
GENG Xiaona, LIU Weidong, FAN Zhenya, et al. Locating and sizing of photovoltaic power and electric vehicle charging stations in distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(10): 24-29.

[7] 许绍良, 宋冶, 苗竹梅, 等. 电网电能损耗计算导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[8] 李佩杰, 罗翠云, 白晓清, 等. 一种求解多相混合配电网潮流的扩展序分量法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 15-23.
LI Peijie, LUO Cuiyun, BAI Xiaoqing, et al. An extended sequence components method for solving multiphase power flow in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 15-23.

[9] 刘庭磊, 王韶, 张知, 等. 采用负荷电量计算低压配电台区理论线损的牛拉法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 143-148.
LIU Tinglei, WANG Shao, ZHANG Zhi, et al. Newton-Raphson method for theoretical line loss calculation of low-voltage distribution transformer district by using the load electrical energy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 143-148.

[10] 胡晓松, 张殷, 谢光彬, 等. 含 PV 节点的配电网合环潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 8-13.
HU Xiaosong, ZHANG Yin, XIE Guangbin, et al. A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 8-13.

[11] 刘伟, 李恒, 孙福杰, 等. 基于 GIS 和区间 FTU 的配电网网损计算方法[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 68-71.
LIU Wei, LI Heng, SUN Fujie, et al. Topology analysis method for loss calculation of distribution network based on feeder sections and GIS[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 68-71.

[12] 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.
ZHU Faguo. Loss calculation method for distribution network with information from field terminal units[J].

- Power System Technology, 2001, 25(5): 38-40.
- [13] 王刚军, 王承民, 李恒, 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.
WANG Gangjun, WANG Chengmin, LI Heng, et al. Calculation method of theoretical network loss in power distribution network based on measured data[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 18-20.
- [14] 汪永华, 王正风. 基于 SCADA/EMS 的负荷实测与网损在线计算的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 96-100.
WANG Yonghua, WANG Zhengfeng. Research and application of power load measurement and on-line power network loss compute based on SCADA/EMS system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 96-100.
- [15] 李滨, 杜孟远, 韦维, 等. 基于准实时数据的智能配电网理论线损计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 123-128.
LI Bin, DU Mengyuan, WEI Wei, et al. Calculation of theoretical line loss based on quasi real-time data of smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 123-128.
- [16] 尹丽燕, 于继来. 多时间段落的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 44-48.
YIN Liyan, YU Jilai. Dynamic reconfiguration (DR) of distribution network with multi-time periods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 44-48.
- [17] GOLSHAN M E H, AREFIFAR S A. Distributed generation, reactive sources and network-configuration planning for power and energy loss reduction[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2): 127-136.
- [18] 刘蔚, 韩祯祥. 基于时间区间的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 33-38.
LIU Wei, HAN Zhenxiang. Distribution system reconfiguration based on time interval[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 33-38.
- [19] 方兴, 郭志忠, 蔡中勤. 基于时间周期的配电网动态重构[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 31-34.
FANG Xing, GUO Zhizhong, CAI Zhongqin. Distribution network dynamic reconfiguration based on time-interval[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 31-34.
- [20] 杨霖, 郭志忠. 系统状态特征化及其在配电网重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 39-44.
YANG Lin, GUO Zhizhong. System state characterization and application to distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 39-44.

收稿日期: 2016-05-22; 修回日期: 2016-08-06

作者简介:

李健(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析, 电能营销计量管理; E-mail: diangai@qq.com

黄俊铭(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力损耗计算与分析; E-mail: 237619862@qq.com

朱建全(1982-), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制。E-mail: zhujianquan@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)