

台区三相不平衡运行监测和治理分析

唐伟¹, 贺星棋², 滕予非¹, 靳旦¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 从当前台区三相不平衡监测和治理问题出发, 开展了台区三相不平衡产生的根源及其对台区线损的影响分析。随后, 针对台区三相不平衡监测, 分析了仅关注配电变压器低压出口三相不平衡度和电量不平衡度 2 个常见做法存在的不足, 并通过构建典型场景, 测算了 2 个监测误区在反映台区线损率上的影响。针对各地常采用的三相不平衡集中补偿措施, 分析了其在补偿三相不平衡度、降低损耗方面的局限性, 并通过典型配电变压器和配电线路阻抗分析进行了验证。最后, 针对上述分析的问题, 提出了针对性的建议措施, 为电网企业、配电网运营商开展低压电网三相不平衡监测和治理提供了思路和参考。

关键词: 台区线损; 三相不平衡; 监测和治理; 集中补偿装置

中图分类号: TM714.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)04-0075-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.017

Operation Monitoring and Regulating Analysis of Three-phase Unbalance in LV Grid

Tang Wei¹, He Xingqi², Teng Yufei¹, Jin Dan¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the monitoring and regulating of three-phase unbalance in low-voltage (LV) grid, the causes of three-phase unbalance phenomenon and its influence on line loss are analyzed. Then, the shortcomings of two common practices in monitoring are analyzed, that is, focusing on the three-phase unbalance degree of the secondary winding of LV transformers and the unbalance degree of electric energy instead of real time power. After that, the limitations of the widely-used three-phase centralized unbalance compensation equipment are analyzed and verified by the impedance analysis of typical distribution transformer and distribution line. Finally, regarding the above-mentioned problems, the specific suggestions are proposed, which provides a reference for power grid enterprises and distribution network operators in monitoring and regulating of three-phase balanced in LV grid.

Key words: area line loss; three-phase unbalance; monitoring and regulating; centralized unbalance compensation equipment

0 引言

线损是电力企业输配电过程中产生的电能损失总和, 具体可分为技术线损和管理线损。当前, 中低压配电网损失电量大, 损耗占比高, 是四川电网线损率偏高的主要原因; 也是降损增效、提升电网经济运行水平的主要对象。在影响低压台区电网损耗偏高的技术因素中, 台区电网三相不平衡是主要原因之一^[1]。

下面将首先分析台区三相不平衡运行产生的根源, 随后剖析当前开展三相不平衡监测中的 2 个常见误区, 并对典型三相不平衡治理措施进行评估, 为台区三相不平衡监测和治理提供思路。

1 台区三相不平衡产生的根源及影响

目前, 低压用户电器大多使用单相电, 且低压用户在配电网中的分布相对分散。出于建设成本和负

荷需求的考量,低压配电网常采用主干线三相四线制、分支线单相下表箱的配电结构。由于单相用户数量在各相的分布不一致、低压用户用电时间分散等原因的影响,低压配电网在运行中常常表现出三相电流、电压不平衡。

在三相四线制低压配电网中,三相不平衡运行常导致中性线电流不为0。因此,中性线电流不为0也是三相不平衡运行的一种表现形式。

台区处于三相不平衡运行状况时,负载较重的相别相电压相对降低,导致线路及变压器铜损增大;另一方面,不平衡电流中的零序分量流经零线产生损耗,三相线路负荷分布不均产生额外损耗。

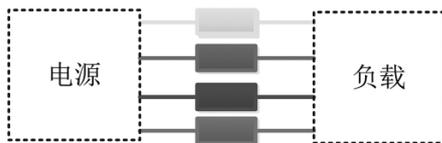


图1 三相四线线段

图1为三相四线导线段示意图。假定单条导线电阻为 R ,忽略电抗和电纳,当三相平衡运行时,假定相电流为 I ,零线电流为0,计算此时的总损耗为

$$\Delta P = 3I^2R \quad (1)$$

当三相不平衡时,此时零线流过电流,分别测算两相带负载、单相带负载情况下的线段总损耗,如表1所示。

表1 不同负载情况下的线段损耗

A相	B相	C相	N线	总损耗
I	I	I	0	$3I^2R$
$1.5I$	$1.5I$	0	$1.5I$	$6.75I^2R$
$2I$	I	0	$\sqrt{3}I$	$8I^2R$
$3I$	0	0	$3I$	$18I^2R$

从表1计算结果可知,三相四线制配电线路在三相电流不平衡时,线段总损耗增加,三相负荷全部由一相承担时,线段总损耗是三相平衡时的6倍。

文献[2]采用式(2)衡量三相电流不平衡度。

$$\varepsilon = \frac{\max\{|I_A - I_{ave}|, |I_B - I_{ave}|, |I_C - I_{ave}|\}}{I_{ave}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: I_A, I_B, I_C 为三相电流有效值, A ; I_{ave} 为三相电流有效值的平均值, A 。

根据式(2)可知,三相电流平衡时,不平衡度达到最小值0;当单相带负载、其余两相空载时,不平衡度达到最大值200%。

2 三相不平衡运行监测的分析

1) 只关注供电点首端不平衡情况

当前,智能电能表覆盖面不断提升,低压电网运行状态数据实现了自动采集和上传^[3]。各地用电信息采集系统中也开发了台区三相不平衡计算和展示模块,用于反映台区三相不平衡运行状态。但是,低压配电网仅在供电点首端(即配电变压器二次侧出口)和用户接入点安装有计量采集装置。受此因素限制,用电信息采集系统或运行人员大多采用配电变压器二次侧出口的日电量数据来度量台区三相平衡运行情况。

但是,仅仅关注供电点首端三相平衡情况的度量方式,无法反映低压配电线路的运行状态,进而无法利用该不平衡度来描述电网经济运行情况。因此,利用该不平衡度为依据开展的三相平衡治理和降损决策在根基上即存在缺陷。

下面,以IEEE 37节点低压网络为例,进行详细说明。假定低压网络及负荷分布情况如图2所示。

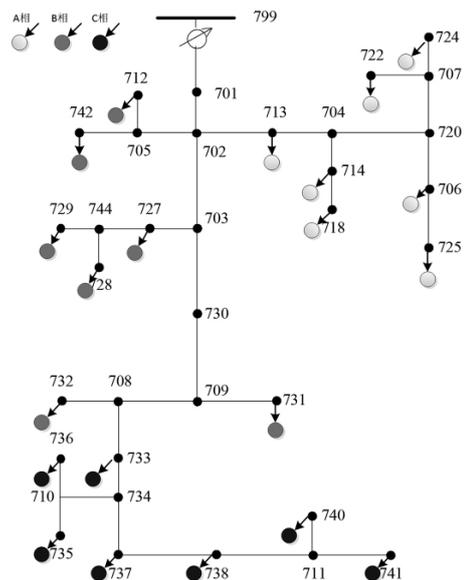


图2 三相负荷不均衡分布台区

图2中,配电变压器低压侧计量装置设在节点701处。假定每个负荷特性相同、大小相等,A、B、C三相分别挂接7个用户,则在配电变压器低压侧(节点701处)采集得到的三相电量大小相等,三相不平衡度为0(此处,由于损耗率相对总电量较低,先忽略负荷接入位置远近对损耗的影响)。由于节点702至节点703之间的线段后端负荷挂接在B相

(5个负荷)和C相(7个负荷),因而线段702—703的三相不平衡度为75%;节点702至节点705之间的线段后端的负荷均为B相,因此线段702—705的三相不平衡度为200%;节点702至节点713之间的线段后端的负荷均为A相,因此线段702—713的三相不平衡度为200%。

因此,配电变压器低压出口侧三相平衡,但与之临近的主干线(702—703、702—705、702—713)均处于不平衡运行状态,采用供电点首端三相平衡情况作为台区的三相平衡情况并不准确。

2) 关注供电点首端不平衡的影响

为分析采用供电点首端三相不平衡情况在反映台区线损方面的影响,设计如下2个场景。

场景1:配电变压器出口平衡,但下级主干线三相不平衡,负荷挂接相别如图2所示。

场景2:配电变压器出口平衡,下级主干线三相尽量平衡,负荷挂接相别如图3所示。

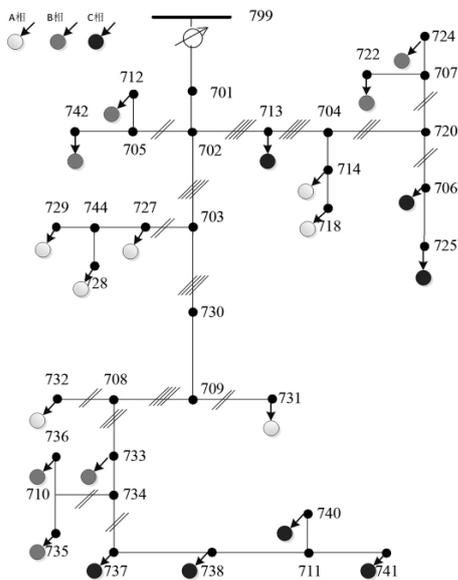


图3 三相负荷均衡分布台区

假定各负荷特性相同、大小相等,均为单相接入。采用四川电网某台区实测的代表日用户的功率、电压及日电量为计算输入数据,电网模型中三相四线制导线采用LGJ-185线路,两相三线和单相二线导线均采用LGJ-120线路,各节点之间的线段长度均为75m,首端负荷形状系数为1.04。

计算结果如表2所示。从表2可知,2个模拟场景的总表不平衡度并未发生较大变化,均处于规程SD 292—1988《架空配电线路及设备运行规程》^[4]规定的三相负荷不平衡度不应大于15%的范围内。但在场景1中,主干线702—713的不平衡度

为200%,702—703的不平衡度为67.91%,远高于场景2对应的27.80%和4.17%。经测算,场景1对应的台区线损率为7.75%,场景2对应的线损率为3.38%,较场景1低4.37个百分点。

表2 主干线平衡情况变化的影响

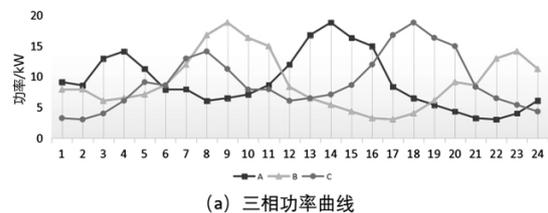
模拟场景	总表不平衡度/%	702—713 线段不平衡度/%	702—703 线段不平衡度/%	台区线损率/%
场景1	4.13	200.00	67.91	7.75
场景2	2.96	27.80	4.17	3.38

通过算例对比发现,仅关注台区供电点的三相平衡情况,无法准确反映低压电网的经济运行状态,可能存在主干线极其不平衡、低压出口平衡的情况。这也说明,在保持配电变压器低压出口侧三相基本平衡情况下,进一步调整下级主干线,降低下级主干线的三相不平衡度,有利于降低台区线损率。

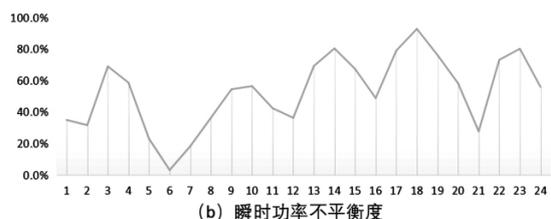
3) 只关注电量平衡,忽略负荷用电特性

电量是一段时间内传输功率的累计值,采用电量数据开展三相平衡情况的监测和分析,具有简洁方便的优点。但是,仅采用电量数据衡量台区三相平衡状态,将无法知道每个时刻功率的平衡情况,可能出现一段时间内的电量平衡但每个时刻功率均不平衡的状态。

例如,图4(a)所示的三相负荷日电量相等,但各相负荷特性不同,存在不同的峰荷时刻点。当采用三相电量衡量时,三相完全平衡;但从瞬时功率来看,当天绝大部分时刻的台区不平衡度超过15%,仅在第6个时刻点呈现功率平衡状态,如图4(b)所示。



(a) 三相功率曲线



(b) 瞬时功率不平衡度

图4 瞬时功率不平衡及其不平衡度

4) 只关注电量,忽略功率平衡的影响

在不改变各用户接入的相别、日电量的前提下,设计了如下2个场景模拟测算电量平衡、功率不

平衡对台区线损的影响。

场景3: A、B、C相用户用电特性保持一致,峰值出现在同一时刻。

场景4: A、B、C相用户用电特性不一致,峰值出现在不同时刻,如图4(a)所示。

分别计算两种场景下的总表电量不平衡度和低压电网线损率,结果如表3所示。

表3 功率不平衡影响分析

模拟场景	总表电量不平衡度/%	台区线损率/%
场景3	2.96	3.38
场景4	1.38	3.93

从表3计算结果可知,场景3和场景4的总表电量平衡情况差异不大,分别为2.96%和1.38%,均处于15%范围内;但场景3的三相不平衡度为3.38%,较场景4低0.55个百分点。

这表明,电量平衡、瞬时功率不平衡,将导致台区线损率相对于三相功率平衡状态下的线损率高,单独采用电量衡量台区平衡状态的方式并不能准确反映台区的经济运行情况。

因此,三相不平衡治理中不能仅关注总表电量的平衡,还应关注电量对应时段内的功率平衡,尽量做到不同用电性质用户在三相中均衡分布。

3 关于三相不平衡集中补偿装置的探讨

当前,各地开展三相不平衡治理的典型措施是在配电变压器低压出口处装设集中补偿装置,兼具无功补偿、负序和零序治理能力^[5],如图5所示。

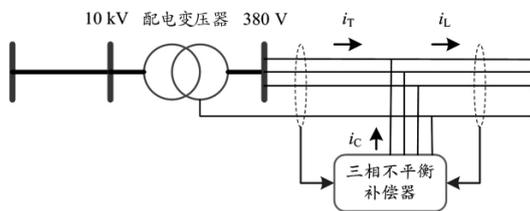


图5 集中补偿装置安装

随着电力电子器件成本下降,集中补偿装置多采用电力电子变流技术,通过采集负荷电流,控制补偿装置输出与不平衡分量相反的负序和零序补偿电流,实现不平衡补偿和治理^[6]。

通过集中补偿器安装位置和补偿原理分析可知,该装置仅能对安装点及对应电网侧的配电变压器的不平衡进行补偿,并未改变其安装点之后接入负荷的特性和接入位置,对低压配电网配电线路的

不平衡运行补偿并无作用。因此,利用集中补偿装置补偿三相不平衡,对降低补偿点靠近负荷侧的低压电网损耗作用有限。

下面,通过配电变压器等效阻抗和典型低压配电线路阻抗对比分析,说明配电变压器低压侧集中补偿在降低台区线损方面的局限性。

参考GB/T 6451—2015《油浸式电力变压器技术参数和要求》^[7],利用三相双绕组无励磁调压变压器典型参数,计算变压器等效电阻。同时,根据变压器容量、低压配电线路额定载流量等信息,选取变压器匹配的低压配电线路型号,按照架空绝缘导线JKLYJ、400 m典型供电半径计算线路等效电阻,结果如表4所示。

从表4计算可知,400 m典型配电线路电阻值远大于配电变压器的等效电阻,比值约为8~13倍。这表明,三相不平衡导致电网损耗的增加主要体现在配电线路,配电变压器因三相不平衡产生的损耗增量远小于配电线路。

因此,安装在配电变压器低压侧出口处的集中补偿装置仅补偿了配电变压器三相不平衡度,对低压配电线路不平衡度没有改善作用,在整体电网降损中的作用有限。

为验证集中补偿装置装设位置对台区损耗的影响,针对图2所示电网,将主干线701—702长度调整为0.1 m,702—703长度调整为200 m,并对主干线702—703采用三相集中补偿方式,设计如下2个场景开展对比。

场景5:三相不平衡集中补偿装置装设在主干线702—703的配电变压器侧(靠近702节点处)。

场景6:三相不平衡集中补偿装置装设在主干线702—703的负荷侧(靠近703节点处)。

分别利用表2计算过程中的数据,计算此时低压台区线损率,结果如表5所示。

从表5可知,将集中补偿装置装设在主干线靠近负荷侧,可尽可能补偿负荷不平衡对台区线损率的影响。在上述计算中,通过将集中补偿装置从主干线702—703的靠近配电变压器侧移动至靠近负荷侧,有效降低了台区线损率0.19个百分点。

因此,在采取集中补偿治理三相不平衡时,应尽量将补偿装置配置在不平衡度较高的主干线靠近用户侧,最大可能降低低压配电网的不平衡度。

表4 典型配电变压器和配电线路阻抗计算

配电变压器容量 /kVA	空载损耗 /kW	负载损耗 /kW	配电变压器等效电阻 /Ω	低压导线截面 (JKLYJ 型号) /mm ²	单位长度电阻 / (Ω · km ⁻¹)	400 m 导线电阻 /Ω	线路电阻与配电变压器等效电阻比
30	0.10	0.63	0.102	16	1.910	0.764	8
50	0.13	0.91	0.053	25	1.200	0.480	9
100	0.20	1.58	0.023	50	0.641	0.256	11
125	0.24	1.89	0.018	70	0.443	0.177	10
200	0.34	2.73	0.010	150	0.206	0.082	8
250	0.40	3.20	0.007	185	0.164	0.066	9
315	0.48	3.83	0.006	240	0.125	0.050	9
400	0.57	4.52	0.004	2 × 150	0.103	0.041	10
630	0.81	6.20	0.002	2 × 240	0.063	0.025	11
800	0.98	7.50	0.002	3 × 185	0.055	0.022	13
1000	1.15	10.30	0.001	3 × 240	0.042	0.017	11

表5 集中补偿装置装设点的影响分析

模拟场景	原始台区线损率/%	补偿后台区线损率/%
场景5	7.80	8.32
场景6	7.80	7.61

4 建议措施

1) 开展三相不平衡监测治理时,不仅要关注配电变压器低压侧的三相负荷不平衡度,更要关注低压配电主干线路或三相四线制主要分支线的负荷平衡情况。

2) 以往采用的利用三相电量计算的三相平衡情况,在描述低压电网经济运行方面存在不足。对此,要充分利用用电信息采集、高速电力载波等技术,监测三相功率的平衡情况,实现更加精细化的三相平衡管理。

3) 在开展三相平衡治理时,建议要先通过低压负荷的特性分析,尽量将不同区域、不同用电特性的负荷在三相均匀分布,从低压电网的末端开始,优先采用人工换相的方式调整用户接入相别,实现三相平衡运行。

4) 若选用集中补偿装置开展三相平衡治理,应尽量将补偿装置配置在不平衡度较高的主干线末端,即尽可能靠近用户侧,充分发挥补偿装置的治理效果,实现接入点至配电变压器的主干线以及配电变压器的集中补偿。

5 结语

分析了当前三相不平衡监测中的2个主要误

区,即是仅关注配电变压器低压出口处的三相平衡情况以及仅关注电量的平衡情况,这两个误区忽略了低压配电主干线及主要分支线的平衡情况,未考虑到功率的平衡情况,致使无法通过不平衡度反映低压台区电网的经济运行状态。同时,还对集中补偿装置治理低压台区三相不平衡进行了探讨。最后,针对上述分析的问题,提出了针对性的建议措施,为电网企业、配电网运营商开展低压电网三相平衡监测和治理提供了思路和参考。

参考文献

- [1] 陈慧,夏桃芳,詹世安.基于用电信息采集系统的分相线损计算[J].电力需求侧管理,2017,19(1):53-57.
- [2] 朱明星,李开金.低压配电网三相不平衡度计算方法与应用[J].电测与仪表,2019,56(2):41-46.
- [3] 宋亚奇,周国亮,朱永利.智能电网大数据处理技术现状与挑战[J].电网技术,2013,37(4):927-935.
- [4] 架空配电线路及设备运行规程:SD 292—1988[S],1988.
- [5] 仇志丽.三相负载不平衡有源补偿装置研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [6] 蔡欣灵,郝思鹏.电网三相不平衡的度量与治理综述[J].电力工程技术,2019,38(5):185-192.
- [7] 油浸式电力变压器技术参数和要求:GB/T 6451—2015[S],2015.

作者简介:

唐伟(1990) 硕士,工程师,从事电网分析、电力系统经济运行和电力数据数控研究。

(收稿日期:2020-03-12)