

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.026

电网三相不平衡的度量与治理综述

蔡欣灵, 郝思鹏

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:近年来,电网中的各类电能质量问题愈加受到重视,对于三相不平衡问题,国内外学者做了大量研究工作,需要系统地分析和整理。三相不平衡由电网中的负序和零序分量引起,国际电工委员会(IEC)提出以负序和正序分量之比值来度量不平衡。由于序分量获取困难,工程中常以量测电压、电流有效值来度量三相不平衡,这类方法形式不统一,且与序分量度量形式不对应,统一的不平衡度量方法亟待构建。三相不平衡主要通过电容型补偿、电力电子变流器型补偿和换相补偿治理。电容型补偿可以实现连续调节但是无法降低线损;换相只能离散投切,无法连续调节。未来应当结合换相与附加补偿手段来治理三相不平衡,获得更好的补偿效果。

关键词:三相不平衡;度量;补偿策略;换相策略

中图分类号:TM715

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0185-09

0 引言

电网三相不平衡指的是供电线路各相电压、电流的幅值不等或相位差偏离 120° 。在低压配电网中,居民用电、单相电弧炉等占有一定比重,负荷的不同时性或三相负载分配不均造成配电网的三相不平衡^[1]。近年来,随着电力系统的发展,各类大功率单相负荷、分布式电源的接入使得三相不平衡问题更为严重,影响电能质量。三相负荷不平衡带来的问题主要有:(1)增加电网线路损耗;(2)影响发电机正常运行;(3)增加配电变压器电能损耗,甚至烧毁变压器;(4)影响电动机的效率和安全性^[2-6]。三相负荷不平衡对配电网供电安全、供电质量和经济运行产生不良影响,是配电网运行薄弱环节之一。

三相平衡系统电压、电流中仅包含正序分量,而三相不平衡系统电压、电流中存在负序分量,一般通过负序分量与正序分量的比值来度量三相不平衡程度。由于相角获取较为困难,为了简便计算,业界学者提出了基于量测量的三相不平衡度量式,但是不同表达式定义下计算结果差异较大,在工程应用中引起困惑。目前治理三相不平衡的措施主要有电容型补偿、电力电子变流器型补偿和换相补偿。电容型补偿法可以实现连续调节,降低不平衡度,但是无法降低线损,成本较高。电力电子变流器理论上可以完全补偿三相不平衡,但易受到雷击的影响。换相补偿包括人工换相和自动换相,前者适用于负荷固定变化的情况,成本较低,但是治

理效果不理想;后者适用于负荷动态变化的情况,实现负荷的动态调整,可以降低线损,但是不能连续调节。

文中分析了三相不平衡产生的原因及对电网的影响,并基于三相不平衡的序分量表达式和电压/电流表达式分析了目前常用三相不平衡度定义的不合理之处,再对目前常用的治理措施进行讨论,分别阐述了3种治理方法的原理、优势和不足,比较了3种治理方式各自的特点,通过仿真进行了验证,并对今后的研究工作进行展望。

1 三相不平衡度的定义

1.1 基于序分量的不平衡度量式

以电压为例,国际电工委员会(International Electrician Commission, IEC)提出的定义如式(1)所示^[7]:

$$\varepsilon = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_1 , U_2 分别为正序、负序分量的有效值。

三相不平衡是由负序和零序分量引起的,但是这种定义方式只考虑了负序不平衡度,忽略了零序不平衡度。国家标准GB/T 15543—2008《电能质量三相电压不平衡》^[8]分别描述了负序不平衡度及零序不平衡度,如式(2)一式(3)所示:

$$\varepsilon_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$\varepsilon_{U0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: U_0 为序分量的有效值。

这种定义方法未能将负序和零序不平衡度形

收稿日期:2019-03-09;修回日期:2019-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607083)

成统一的概念。另外,在基于序分量的不平衡度定义下,不平衡度可能超过 100%,工程中难以解释,因此有必要进一步完善,构建更为合理的描述形式。

1.2 基于电压/电流的不平衡度度量式

基于序分量定义的不平衡率计算中需要获得各物理量的相角关系以进行相序分解。通常仪表主要测量有效值,难以获取相角,因此有学者提出基于量测量的三相不平衡度计算方法。

一般情况下,三相负载相位差很小,相电压偏差并不大,因此提出了多种基于量测量的不平衡度简化定义式,IEEE Std.936—1987 采用相电压定义,简化了计算,但是误差较大,如式(4)所示^[9]:

$$\varepsilon = \frac{U_{pmax} - U_{pmin}}{U_{pav}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: U_{pmax} 为三相相电压中的最大值; U_{pmin} 为三相相电压中的最小值; U_{pav} 为相电压的平均值。

美国电器制造商协会(National Electrical Manufacturers Association, NEMA)定义电压不平衡度为线电压不平衡率^[10-11]。

文献[8]推荐了一种计算方法,只需要知道三相相电压的大小,如式(5)所示。

$$\varepsilon_L = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L}}{1 + \sqrt{3 - 6L}}} \quad (5)$$

其中:

$$L = \frac{U_A^4 + U_B^4 + U_C^4}{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)^2} \quad (6)$$

式中: U_A, U_B, U_C 分别为三相电压的有效值。由于采用相电压计算,这种方法仅适用于三相三线制。

国际大电网委员会(CIGRE)推荐了适用于三相三线制和三相四线制系统的计算方法^[12]。文献[13]改进了正序、负序向量图解法,文献[14]用线电压计算正序、负序分量,对传统三相不平衡度的计算方法进行改进,计算结果与 CIGRE 相同,但是适用范围比较小。

文献[15—17]指出 NEMA 定义的近似公式适用于不平衡度较小的场合,在 IEEE Std.112—1991 定义中,当电压幅值相等时,无论相角如何变化,不平衡度始终为 0,IEEE Std.936—1987 定义式的计算结果通常大于其他计算式的结果。在三相三线制系统中,若不平衡度较小,可以使用 IEEE Std.936—1987 和 IEEE Std.112—1991 定义式。文献[18]指出,与国标定义式相比, CIGRE 定义式只需要线电压的大小且计算结果与国标定义完全相同。以上几种三相不平衡度度量方法的比较如表 1 所示。

表 1 不同度量方法比较

Table 1 Comparison of different measurement methods

定义方法	简便性	精确性	适用范围
IEC	复杂	精确	所有
IEEE Std.936—1987	简便	不精确	三相三相制
IEEE Std.112—1991	简便	不精确	三相三线制
NEMA	简便	不精确	所有
国标	较复杂	不精确	三相三线制
CIGRE	较复杂	精确	所有

综上,目前三相不平衡度量方法存在的问题有:(1)有的方法仅采用负序与正序分量比值来定义三相不平衡,有的方法分别描述负序和零序不平衡度,均不能完整、准确地体现电网三相不平衡特性;(2)基于量测量的度量方式有的计算简单但缺乏与序分量度量形式的对应关系,有的表达形式复杂且未考虑零序分量,适用范围较小。

2 三相不平衡的治理

目前三相不平衡的治理措施主要有电容型补偿、电力电子变流型补偿和换相补偿^[19]。

2.1 电容型三相不平衡补偿

电容型三相不平衡补偿依靠电容补偿装置实现,实时检测三相负荷不平衡电流,通过投切开关控制电容器进行分相调节,实现补偿功能^[20]。

2.1.1 补偿装置

随着配电网无功补偿技术的快速发展,涌现出了各类无功补偿装置,静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)可实现无功补偿输出功率从感性到容性的平滑变化,具有反应较快、动态补偿的优势^[21]。静止无功发生器(static var generator, SVG)可以显著降低谐波含量,具有体积小,响应速度快,调节方便,可同时补偿无功、三相不平衡以及谐波等优点^[22]。有源电力滤波器(active power filter, APF)不仅可以降低自身产生的谐波含量,还可以补偿负载的谐波和无功功率^[23-24]。

2.1.2 补偿策略

对于三相三线制系统,根据 Steinmetz 电路理论可以得到三角形接法的理想补偿网络^[25]。对于三相四线制系统, Δ 负荷可以用三相三线制下的补偿导纳公式消除,对于带中性线的星形负荷,应用 Δ 和 Y 形接线方法共同补偿。 Δ 补偿方式适用于无功较均衡的场合, Y 补偿方式适用于负载不平衡的场合, Δ 和 Y 相结合的补偿方式兼具二者的优点,适用于任何形式负载。

(1) 依据理想补偿导纳网络的补偿策略。

Steinmetz 对三相三线制电力系统中的不平衡情况进行了大量的研究,提出了采用理想补偿网络对不平衡进行改善^[26]。

王氏定理指出:(a)在两相间跨接电阻可以在相间转移无功;(b)在两相间跨接电感或电容可以在相间转移有功;(c)在三相四线制系统中,恰当选择2个元件(电阻、电容、电感或其组合),并将这2个元件恰当地接在不同相线与零线之间,可以抵消零线电流。根据王氏定理,可以得出三相三线制下的补偿导纳公式。

文献[27]应用叠加原理,采用Y- Δ 接线方式组合,得出一般的三相不平衡负载平衡化无功补偿公式。文献[28]结合实际电容器的配置,利用规划的思想,推导了三相四线制下的补偿算法。

(2) 依据对称分量法的补偿策略。理想补偿导纳网络理论只能作为补偿原理的说明,实际很难测出负荷导纳值,文献[29—32]用对称分量法推导出采用线电压和线电流表示的补偿电纳公式。文献[33—34]推导了三相四线制系统中3种不同约束条件下的补偿导纳公式。

(3) 依据瞬时无功功率理论的补偿策略。文献[35]介绍了瞬时无功功率理论的基本内容,建立了其最优化数学模型。文献[36]基于瞬时无功功率理论,提出了不平衡无畸变线性系统补偿电纳的计算方法。文献[37]提出了一种基于瞬时无功功率理论的补偿导纳新算法,在进行无功补偿的同时实现三相不平衡补偿。

电力系统中,通常都会在相间安装无功补偿装置改善系统的不平衡度,但是该方法不能降低线损,需要较大的补偿容量,另外无功补偿装置体积大,安装维护成本高,虽然能够有效补偿三相不平衡的基波负序电流,但对基波零序电流基本没有补偿效果,无法彻底治理配电台区低压侧线路的三相负载不平衡问题。

2.2 电力电子变流型三相不平衡补偿

2.2.1 补偿装置

有源不平衡补偿装置利用电力电子变流技术主动补偿负载的基波不平衡电流,从而降低不平衡度,同时具备无功补偿功能^[38]。其基本构件是由全控型电力电子器件构成电压源变流器,对负序和零序电流进行实时检测,并控制变流器产生与负序和零序电流反相的补偿电流。

2.2.2 补偿策略

文献[39—40]分析了基波正序电流分量检测的基本原理,以及基于此种控制方式的配电网有源

补偿装置在谐波、无功、三相不平衡方面的补偿特性。

电力电子变流型三相不平衡治理装置受安装位置和资产管理的限制,只能改善接入点之前电网的三相不平衡,另外电力电子开关器件本体的通态和关断损耗,以及入口滤波器中电抗器的有功损耗不容忽视,目前基于低功耗全控器件的升级换代解决方案尚处于初级阶段。

2.3 换相补偿

负荷常年固定变化的情况下,可以采用人工换相^[41]。人工换相成本较低,但需对数据进行大量采集并统计分析从而得出换相方案,对技术人员的实际操作经验要求较高,治理效果并不理想^[42]。

自动换相通过自动切换用户相序对三相不平衡进行治理。自动换相装置主要由台区控制终端和智能换相开关组成^[43],图1为台区自动换相操作机构电路示意图。

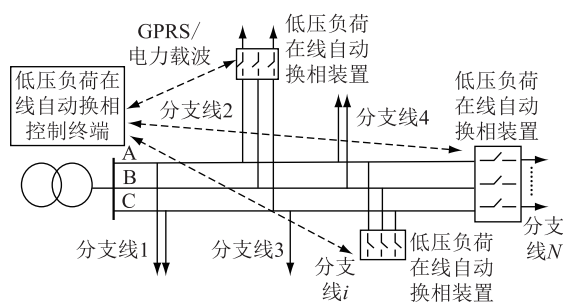


图1 台区自动换相操作机构电路

Fig.1 Circuit of low voltage load on-line automatic commutation

2.3.1 换相开关

传统机械开关功耗较低,导通能力较强,但是由于存在触点所以换相时间较长,且难以频繁操作,不能满足三相不平衡治理的需要。文献[44—45]在模拟环境下对机械换相开关的性能进行试验,实测换相时间较长。为了缩短换相时间,需采用基于半导体器件的固态开关。文献[46]采用固态智能换相开关实现各相之间的无扰动换相。但固态换相开关关断过程需在电流过零点,且存在反向阻断过程,有一定延时,换相过程中信号的时序控制要求较高,抗雷击能力较差。永磁开关机械性能高,抗腐蚀性好,在安全性、使用年限和维护成本上具有一定优势,适用于操作频繁的用电领域^[47]。

换相开关的安装数目主要依据负荷的不平衡度以及不平衡量确定。配电台区的不平衡度和不平衡量不断改变,需要制定较为完善的算法确定换相开关的安装数目^[48—49]。另外,换相开关应尽可能均匀分布,以保证设备具有一致的使用寿命。

2.3.2 换相策略

(1) 基于电流的换相策略。文献[50]介绍了基于电流不平衡的换相策略, ΔI_x 为任意一相电流与电流均值之差, 若 $\Delta I_x > 0$, 对应的负荷相需要转移负荷; 若 $\Delta I_x < 0$, 对应负荷相需要接收负荷。

文献[51]建立了以配电台区三相电流不平衡度最小和换相过程中低压负荷在线自动换相装置开关切换次数最少为目标的多目标最优换相数学模型, 给出配电台区三相负荷不平衡实时在线治理控制策略。文献[52]对各用户负荷的接入相别进行实时监测并调整, 从而降低不平衡度。文献[53]将电力业务算法与计算机技术相结合, 提出了适合计算机实现的三相不平衡调整方案自动生成流程和优选算法。

(2) 基于有功功率的换相策略。随着分布式电源的接入, 配电网除了负载外, 还包含电源及大量的储能装置, 此时不仅要关注电压、电流的大小, 还需关注功率流向^[54-55]。文献[56]提出基于有功功率的换相策略, 根据计算出的不平衡度判断是否需要换相以及需要进行负荷投切的相别和容量, 以 A 相为例:

若负荷 $P_A > P_B > P_C$, 则需将部分负荷从重载的 A 相投至轻载的 C 相; 若负荷 $P_A = P_B > P_C$, 从 A 相和 B 相中综合筛选出与调整量最为接近的负荷组合投至 C 相; 若负荷 $P_A > P_B = P_C$, 直接从 A 相选择与调整量最为接近的负荷组合投至 B 相或者 C 相。

通过自动换相装置调整相序, 可以降低线路的损耗和不平衡度。自动换相开关体积较小, 但只能进行离散投切, 精度不高, 且现有的开关大多不能频繁换相, 治理效果十分有限, 不能做到完全补偿。

3 常见治理方法比较与仿真验证

文中分别从改善效果、响应时间、安装位置、本体损耗、噪声、装置体积和价格 7 个方面对电容型补偿、电力电子变流型补偿和自动换相 3 种三相不平衡治理措施进行比较, 如表 2 所示。

3.1 电容型补偿仿真验证

在三相不平衡系统中, 补偿前三相负载分别为 $P_A + jQ_A = 25 + j14$, $P_B + jQ_B = 27 + j14$, $P_C + jQ_C = 28 + j16$, 单位为 $kV \cdot A$ 。SVG 治理后, 三相电流变化曲线如图 2 所示。

由图可知, 补偿前三相不平衡较为严重, 投入补偿后系统电流不平衡度下降至 2%, 不平衡度没有完全改善。

表 2 3 种常见三相不平衡治理措施的比较

Table 2 Comparison of 3 common three-phase unbalance control measures

比较项目	电容型补偿	电力电子变流型补偿	自动换相
改善效果	不能完全改善	可以完全改善	不能完全改善
响应时间/ms	≤ 20	≤ 20	≤ 10
安装位置	线路首端、中间和末端	线路首端、中间和末端	线路首端和中间
本体损耗	不大于安装容量的 0.8%	不大于安装容量的 3%	不大于安装容量的 0.5%
噪声/dB	≤ 65	≤ 65	可忽略
装置体积	体积最大	体积中等	体积最小
价格	价格最低	价格中等	价格最高

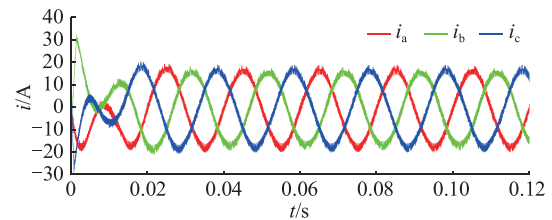


图 2 补偿前后三相电流

Fig.2 Three-phase current before and after compensation

3.2 电力电子变流型补偿仿真验证

补偿前三相负载分别 $P_A + jQ_A = 21.2 + j11.7$, $P_B + jQ_B = 22.7 + j11.4$, $P_C + jQ_C = 23.7 + j13.4$, 单位为 $kV \cdot A$ 。基于电力电子变流型补偿装置治理前后的三相电流变化曲线如图 3 所示。

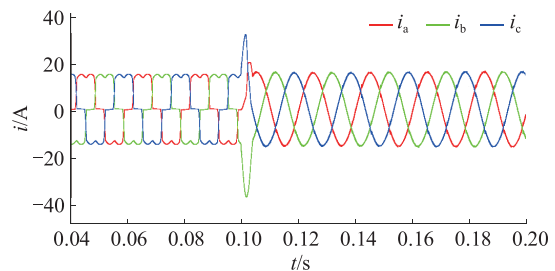


图 3 补偿前后三相电流

Fig.3 Three-phase current before and after compensation

投入电力电子变流器型补偿装置后, 三相不平衡度明显下降。

3.3 换相仿真验证

经过测量 A 相有功 $P_A = 30$ kW, B 相有功 $P_B = 50$ kW, C 相有功 $P_C = 10$ kW。采取基于有功功率的换相策略治理前后配变低压侧三相电流变化情况如图 4 所示。

在安装永磁换相开关之后, 该台区电流幅值基本一致, 不平衡度下降至 6%。

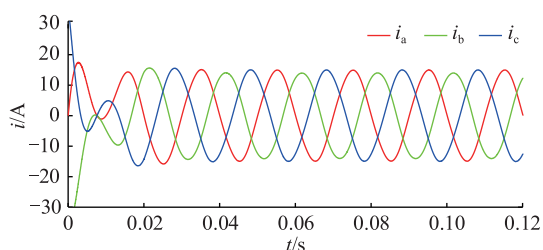


图4 补偿前后三相电流

Fig.4 Three-phase current before and after compensation

4 结语

文中总结了目前三相不平衡度的定义,IEC 只定义了负序三相不平衡度,忽略了零序不平衡度;国标对三相负序不平衡度和零序不平衡度分别进行了描述,需要进一步改进基于序分量的三相不平衡度定义式,将零序不平衡度和负序不平衡度统一起来。工程中通常采用基于量测量的三相不平衡度定义式来简化计算,表达形式简单但没有与基于序分量的三相不平衡度定义式相对应,计算结果在某些情况下误差较大。CIGRE 推荐的计算方法表达形式复杂,仅适用于线电压,适用范围比较小。

目前常用的3种三相不平衡治理措施有:电容型补偿、电力电子变流型补偿和换相补偿。电容型治理装置可以补偿负序电流但是对零序电流没有补偿效果,单独使用这种治理方法需要较大容量,安装和维护成本很高。电力电子变流器型装置受安装位置的限制,无法做到完全补偿。换相可以降低线损,但是只能离散投切,此外频繁换相会影响开关寿命。3种方法各有优势与缺陷,未来应考虑将多种治理方式联合使用,如电容型补偿和换相二者结合,首先用自换相装置对有功进行治理,然后再用无功补偿装置对无功不平衡量进行治理,取得最佳的治理效果。

参考文献:

- [1] 汪蕾. 配变三相不平衡运行对电网影响的分析及补偿方法的研究[D]. 南京:东南大学,2011:31-32.
WANG Lei. Research on influence and compensation method of three-phase unbalanced operation in distribution network [D]. Nanjing:Southeast University, 2011:31-32.
- [2] 高辉,徐晴,欧阳曾恺,等. 含多类型分布式电源的源网荷协调优化控制策略分析[J]. 电力工程技术,2018,37(4):21-26.
GAO Hui, XU Qing, OUYANG Zengkai, et al. Analysis of the optimal control strategy for source network load with multi-type distributed power source[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):21-26.
- [3] 王若丞. 配电网三相不平衡对线损增加率及电压偏移的影响[J]. 电力工程技术,2017,36(4):131-136.
WANG Ruocheng. Influence of distribution network three-phase unbalance on line loss increase rate and voltage offset[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4):131-136.
- [4] 郭峰,姚莉娜,刘恒,等. 引入三相不平衡度的低压电网理论线损计算[J]. 电力自动化设备,2007,27(11):51-54.
GUO Feng, YAO Lina, LIU Heng, et al. Theoretical line loss calculation with three-phase unbalance degree for low-voltage distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11):51-54.
- [5] 闫志强,雷霞,何建平,等. 三相不平衡对配电变压器损耗影响的研究[J]. 电测与仪表,2017,54(16):43-49.
YAN Zhiqiang, LEI Xia, HE Jianping, et al. Study on the influence of three-phase unbalance on distribution transformer loss [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54(16):43-49.
- [6] 黄勃,陈永明,朱雷. 低压配电网三相不平衡对变压器出力损失影响研究[J]. 中国设备工程,2017(12):204-205.
HUANG Bo, CHEN Yongming, ZHU Lei. Study on the influence of three-phase unbalance of low-voltage distribution network on transformer output loss [J]. China Plant Engineering, 2017(12):204-205.
- [7] Testing and measurement techniques: unbalance, immunity test: IEC 61000-4-27, [S].
- [8] 电能质量三相电压不平衡:GB/T 15543—2008[S].
Power quality three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008[S].
- [9] BOLLEN M. Definition of voltage unbalance [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(11):49-50.
- [10] SINGHA K, SINGHG A, MITRA R. Some observations on definition of voltage unbalance [C] // 39th North American Power Symposium (NAPS 2007), New Mexico, USA. IEEE, 2007: 473-479.
- [11] 周林,张有玉,刘强,等. 三相不平衡度算法的比较研究[J]. 华东电力,2010,38(2):210-214.
ZHOU Lin, ZHANG Youyu, LIU Qiang, et al. Comparative study of three-phase unbalance algorithm [J]. East China Electric Power, 2010, 38(2):210-214.
- [12] CIGRE. A new simple and effective approximate formulation for the determination of three-phase unbalance by voltmeter method [C] // CIGRE. Belgique, 1986.
- [13] GHIJSELEN J A L, BOSSCHEA P M V D. Exact voltage unbalance assessment without phase measurements [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1):519-520.
- [14] WAGNER C, EVANS R. Symmetrical components as applied to the analysis of unbalanced electrical circuits [M]. London: McGraw-Hill, 1933.
- [15] PILLAY P, MANYAGE M. Definitions of voltage unbalance [J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(5):49-51.
- [16] RODRIGUEZ A D, FUENTES F M, MATTA A J. Comparative analysis between voltage unbalance definitions [C] // Engin-

- ring Applications-International Congress on Engineering (WEA), Bogotá, 2015: 1-7.
- [17] CHEN T H, YANG C H, YANG N C. Examination of the definitions of voltage unbalance[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2013, 49: 380-385.
- [18] PAVEL B, NIKOLAI P. Apparent power and its components identification and simulation in three-phase systems with unbalanced load [C]//IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. Riga, 2017: 473-479.
- [19] 程晨. 低压配电网三相不平衡治理的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 3-4.
- CHENG Chen. Research on three-phase unbalance control of low voltage distribution network [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 3-4.
- [20] 万玉良, 项颂, 刘海波, 等. 三相四线制低压配电网三相不平衡治理装置选型研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2017, 38(6): 113-118.
- WAN Yuliang, XIANG Song, LIU Haibo, et al. Study on selection of three-phase unbalance control device for three-phase four-wire low voltage distribution network[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2017, 38(6): 113-118.
- [21] 房雪涛. 配电网三相不平衡负载的无功补偿技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015: 2-21.
- FANG Xuetao. Research on reactive power compensation technology of three-phase unbalanced load in distribution network [D]. Nanjing: Southeast University, 2015: 2-21.
- [22] 张薇. 静止无功发生器不平衡运行方式的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 3-4.
- ZHANG Wei. Research on unbalanced operation mode of SVG [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014: 3-4.
- [23] 夏雨. 三相四线制并联型有源电力滤波器的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017: 2-3.
- XIA Yu. Research on three-phase four-wire parallel active power filter [D]. Nanning: Guangxi University, 2017: 2-3.
- [24] 巩华刚, 臧朝伟, 张贵生, 等. 基于 APF 的静止无功发生器应用研究[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(2): 65-68.
- GONG Huagang, ZANG Chaowei, ZHANG Guisheng, et al. Application of static var generator based on APF [J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(2): 65-68.
- [25] 王一, 刘建政. 不对称电压下不平衡负载的平衡化补偿方法[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(10): 85-93.
- WANG Yi, LIU Jianzheng. Balanced compensation for unbalanced load in condition of asymmetrical voltage [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(10): 85-93.
- [26] GYUGYI L, OTTOR A, PUTMAN T H. Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, 97(5): 1935-1945.
- [27] 单铁铭, 杨仁刚. 不平衡电流无功补偿方法研究[J]. *电力自动化设备*, 2004, 24(12): 26-28.
- SHAN Tieming, YANG Rengang. Reactive power compensation for unbalanced current [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2004, 24(12): 26-28.
- [28] 黄国栋, 杨仁刚, 冯小明. 三相不平衡负载无功补偿方法的研究[J]. *电测与仪表*, 2011, 48(544): 23-26.
- HUANG Guodong, YANG Rengang, FENG Xiaoming. Research on reactive compensation method for unbalanced load [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2011, 48(544): 23-26.
- [29] 房俊龙, 于洪涛, 马文川, 等. 农村电网不对称负荷补偿方法研究[J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(7): 108-111.
- FANG Junlong, YU Hongtao, MA Wenchuan, et al. Study on compensation method of unbalanced load in rural power grid [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2014, 45(7): 108-111.
- [30] 张明江, 纪延超, 顾强. 三相不平衡与无功功率的综合补偿方法[J]. *电网技术*, 2008, 32(1): 20-23.
- ZHANG Mingjiang, JI Yanchao, GU Qiang. Integrated compensation scheme for three-phase unbalance and reactive power [J]. *Power System Technology*, 2008, 32(1): 20-23.
- [31] 张永军, 孟文博, 赵积春, 等. 三相不平衡与无功功率综合补偿系统的研究[J]. *电工技术杂志*, 2004(12): 63-65.
- ZHANG Yongjun, MENG Wenbo, ZHAO Jichun, et al. The study of integrated compensation system for three phases unbalance and reactive power [J]. *Electrotechnical Magazine*, 2004(12): 63-65.
- [32] 纪飞峰, 周荔丹, 姚钢, 等. 基于同步对称分量法的静止无功补偿装置[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(6): 24-29.
- JI Feifeng, ZHOU Lidan, YAO Gang, et al. Static var compensator based on the method of synchronous symmetrical component [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(6): 24-29.
- [33] 王江彬, 田铭兴, 陈敏, 等. 基于 Steinmetz 理论的三相四线制不平衡电流补偿[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(9): 20-26.
- WANG Jiangbin, TIAN Mingxing, CHEN Min, et al. Three-phase four-wire unbalanced current compensation based on Steinmetz theory [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(9): 20-26.
- [34] 孙建新. 改进型配电台区无功综合补偿控制器[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2017, 38(2): 28-32.
- SUN Jianxin. Modified reactive power comprehensive compensation controller for distribution network [J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2017, 38(2): 28-32.
- [35] 王丽, 刘会金, 王陈. 瞬时无功功率理论的研究综述[J]. *高压技术*, 2006, 32(2): 98-103.
- WANG Li, LIU Huijin, WANG Chen. Summary of the instantaneous reactive power theory [J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(2): 98-103.
- [36] 韦钢, 陈森环, 蔡阳, 等. 基于瞬时无功功率理论的三相不平衡负荷补偿[J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(2): 59-62.
- WEI Gang, CHEN Senhuan, CAI Yang, et al. Compensation for three-phase unbalanced load based on instantaneous reactive

- power theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010,30(2):59-62.
- [37] 丁仁杰,刘健,赵玉伟,等. 不平衡电路的瞬时功率分析及不对称负荷补偿方法[J]. 电工技术学报,2007,22(1):120-124.
DING Renjie, LIU Jian, ZHAO Yuwei, et al. An analysis of instantaneous power in unbalanced circuits and a method to compensate unbalanced load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 120-124.
- [38] 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,2017:4-6.
QIU Zhili. Research on active compensation equipment of three phase unbalanced load [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 4-6.
- [39] 徐在德,范瑞祥,王文彬,等. 电压不平衡下正序有功有源装置补偿特性研究[J]. 电气传动,2017,47(9):70-74.
XU Zaide, FAN Ruixiang, WANG Wenbin, et al. Research on compensation characteristics of positive-sequence active compensation device under voltage unbalance [J]. Electric Drive, 2017, 47(9): 70-74.
- [40] 徐在德,范瑞祥,潘本仁,等. 基于基波检测原理的配电台区有源补偿装置研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(12):133-139.
XU Zaide, FAN Ruixiang, PAN Benren, et al. Research and application for active compensation of power distribution device based on the principle of fundamental wave detection [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 133-139.
- [41] WENCHAO J, XIN Z. A control algorithm for reactive power compensation of ferroalloy furnace base on spline interpolation [C] // 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Changchun, 2010:102-112.
- [42] 喻勇. 三相不平衡综合治理措施及智能换相 GUI 系统研究[D]. 南昌:华东交通大学,2015:3-8.
YU Yong. Research on unbalanced three-phase comprehensive treatment measures and intelligent commutation GUI system [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2015: 3-8.
- [43] 王晴. 三相负荷不平衡调整开关及其应用[J]. 农村电气化,2011,1(8):5.
WANG Qing. Three-phase load unbalance adjustment switch and its application [J]. Rural Electrification, 2011, 1(8): 5.
- [44] 叶伟杰. 江西电网配电变压器三相不平衡综合治理措施研究[D]. 南昌:南昌大学,2013:19-20.
YE Weijie. Research on comprehensive control measures of three-phase unbalance of distribution transformer in Jiangxi power grid [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013: 19-20.
- [45] 孙建东,蔡月明,岳仁超. 智能换相开关低压模拟环境的设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表,2015(8):194-195.
SUN Jiandong, CAI Yueping, YUE Renchao. Design and implementation of low voltage simulation environment for intelligent commutation switch [J]. Automation & Instrumentation, 2015(8): 194-195.
- [46] 张文斌,赵维,熊星,等. 基于三相负荷平衡控制的电网节能降损技术[J]. 农村电气化,2014(8):13-15.
ZHANG Wenbin, ZHAO Wei, XIONG Xing, et al. Energy-saving and loss-reduction technology of power grid based on three-phase load balance control [J]. Rural Electrification, 2014(8): 13-15.
- [47] 黄胜利,李洪涛. 基于固态智能换相开关的三相负荷不平衡解决方案研究[J]. 电器与能效管理技术,2016(5):13-17.
HUANG Shengli, LI Hongtao. Research on three phase unbalanced loads based on solid-state intelligent switching-phase switch [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(5): 13-17.
- [48] 王瑶. 低压开关的永磁控制技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2014:32-33.
WANG Yao. Research on electromagnetic system of control and protective switching devices [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014: 32-33.
- [49] 李卫峰,姚陆通. 一种永磁真空任意换相开关:2013104573-87. 9 [P]. 2013-09-30.
LI Weifeng, YAO Lutong. Permanent magnet vacuum arbitrary commutation switch; 201310457387. 9 [P]. 2013-09-30.
- [50] 张志华,李今宋,周捷,等. 低压三相负荷不平衡治理控制策略研究[J]. 电气自动化. 2016,38(2):69-71.
ZHANG Zhihua, LI Jinsong, ZHOU Jie, et al. A study on the control strategy of low-voltage three-phase load unbalance [J]. Electrical Automation, 2016, 38(2): 69-71.
- [51] 方恒福,盛万兴,王金丽,等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2185-2193.
FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2185-2193.
- [52] 陆惠斌,徐勇,伍宇翔,等. 基于换相技术的三相不平衡治理装置研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(6):64-69.
LU Huiyin, XU Yong, WU Yuxiang, et al. Study on three phase unbalance control device based on commutation technology [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(6): 64-69.
- [53] 李峻,刘一涛,陈菊红,等. 低压三相不平衡调整优选方案的计算机实现[J]. 电力电气,2013,32(21):55-57.
LI Jun, LIU Yitao, CHEN Juhong, et al. Computer implementation of low-voltage three-phase unbalance adjustment optimization scheme [J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(21): 55-57.
- [54] 高辉,徐晴,欧阳曾恺,等. 含多类型分布式电源的源网荷协调优化控制策略分析[J]. 电力工程技术,2018,37(4):21-26.
GAO Hui, XU Qing, OUYANG Cengkai, et al. Analysis of the optimal control strategy for source network load with multi-

type distributed power source [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):21-26.

- [55] 蒋贤强,徐青山,柳丹,等.含分布式电源的交直流配网双层规划研究[J].电力工程技术,2018,37(4):27-32.

JIANG Xianqiang XU Qingshan, LIU Dan, et al. Two-layer model of AC/DC distribution network containing DGs [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):27-32.

- [56] 郝思鹏,储婷.基于有功不平衡自动换相控制策略的三相不平衡治理方法和换相系统;201710017512.2[P].2017-05-17.

HAO Sipeng, CHU Ting. Three-phase unbalanced treatment method and commutation system based on active unbalanced

automatic commutation control strategy;201710017512.2[P].2017-05-17.

作者简介:



蔡欣灵

蔡欣灵(1995),女,硕士在读,研究方向为配电网自动化与三相不平衡治理(E-mail:981787374@qq.com);

郝思鹏(1971),男,博士,教授,研究方向为配电网自动化与三相不平衡治理。

Review of the measurement and control of three-phase unbalance

CAI Xinling, HAO Sipeng

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The negative sequence and the zero sequence component cause three-phase unbalance. IEC proposes to measure the imbalance with the ratio between negative sequence and positive sequence component, ignoring the zero sequence component. Because of the difficulty in obtaining the sequence component, the RMS value of the measured voltage and current is often measured in the project. In contrast, such metrics exist in many forms and do not correspond to the order component metrics. It is urgent to construct a unified unbalance measurement method to considering the zero sequence and the non-correspondence between the quantity measurement and the sequence component. Three-phase unbalance control mainly relies on capacitive compensation, power electronic converter type compensation and commutation. Among them, capacitive compensation can achieve continuous adjustment but can not reduce line loss. Commutation can only be discretely switched and cannot be continuously adjusted. In the future, these two methods should be combined to manage the three-phase unbalance, in order to optimize the compensation effect.

Keywords: three-phase unbalance; metric; compensation strategy; commutation strategy

(编辑 胡昊明)