

非正弦非平衡电力系统视在功率研究

黄晓青, 王晓茹, 王德林, 张丽

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 电力系统中非线性元件的急剧增加,造成电流电压波形的畸变和不对称日益严重。尽管非正弦波形下有有功功率的定义已确定无疑,但视在功率的定义存在争议,导致功率因数的差异。对工业界广泛使用的算术视在功率和矢量视在功率与 IEEE1459 - 2000 试行标准中有效视在功率的定义进行了对比分析,通过线损和视在功率的关系证明了传统定义局限性和有效视在功率定义的科学性;以三相不对称的牵引电力网为例,根据德昌牵引变电所实测数据进行了仿真试验,通过计算结果的分析,证实了有效视在功率在实际应用中的现实意义。

关键词: 非正弦; 非平衡; 视在功率; 功率因数; 电力系统

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)12-0030-05

0 引言

在单相和三相正弦对称系统中,有功功率、无功功率、视在功率的定义得到广泛认同并沿用至今。但在过去的几十年中,随着电力电子技术的发展,电力系统中的非线性元件急剧增加,造成电压和电流波形的畸变和不对称日益严重。尽管非正弦波形下有有功功率的定义已确定无疑,但传统的视在功率的定义已不适用于现代电力系统分析的现状。近几年,国内外很多文献针对非正弦情况下功率定义进行了大量研究^[1~9],根据功率定义的不同适用范围,将功率理论分为三类^[10]:第一类适用于谐波和无功功率的辨识;第二类适用于谐波和无功功率的补偿和抑制;第三类适用于仪表测量和电能的管理、收费等。但到目前为止,在多相系统负载不平衡或电流电压非正弦情况下,视在功率定义尚未得到统一,视在功率计算公式的不同,使得计算出的功率因数存在很大差别,不能正确反映电气设备的利用率、有效地降低线损,不能为功率因数的提高提供科学依据。而电力系统中线路损耗 P 和视在功率 S 的平方近似满足线性关系 $P = a + bS^2$,这一特性可以作为正确定义视在功率的依据^[11,12]。

美国电子与电气工程师学会 (IEEE) 试行标准 1459 - 2000 是 IEEE 非正弦工作组 (IEEE Working Group on Non-sinusoidal Situations) 总结了数年来功率定义的研究成果,对 Budeanu 提出的功率定义进行了完善和扩充,基于用户使用电能计费、工程经济决策和主要谐波污染测量的目的,对有功功率 P 、非

有功功率 N 、视在功率 S 等进行了详尽的定义。A. E. Emanuel 在文献 [11] 中,将目前工业界广泛使用的算术视在功率和矢量视在功率与 IEEE1459 - 2000 试行标准中有效视在功率的定义进行了对比分析,通过诸多例子证明无论负载是线性还是非线性、平衡还是非平衡,只有有效视在功率能满足 $P = a + bS^2$ 。

本文介绍了单相和三相电力系统的算术视在功率和矢量视在功率以及 IEEE1459 - 2000 试行标准中有效视在功率的定义,指出了算术视在功率和矢量视在功率的局限性;同时通过视在功率与线损的关系证明了有效视在功率的有效性和科学性,并以德昌牵引变电所提供的数据为依据,构造了三相不对称系统,分别在牵引变压器的低压侧和高压侧进行了仿真试验,用不同视在功率定义进行了计算,对视在功率和功率因数结果的差别进行了分析,证明在实际系统中,有效视在功率的平方能很好的满足与线损的线性关系,能较准确地估计线路损耗。

1 单相非正弦系统功率和功率因数定义

1.1 单相系统非正弦波形下有功功率、视在功率和功率因数

设单相电路非正弦波形下的电压和电流分别表示如下

$$\begin{cases} v(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \\ i(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \theta_h) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $v(t)$ 是瞬时电压, V_h 是第 h 次谐波电压有效值, θ_h 是第 h 次谐波电压初相角, $i(t)$ 是瞬时电流, I_h 是第 h 次谐波电流有效值, ϕ_h 是第 h 次谐波电流初相角。

单相电路非正弦波形下有功功率 (又称平均功率) 定义为:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{t_0}^{t_0+kT} v i dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \theta_h = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (2)$$

反映了电路中消耗的能量, 具有清晰的物理意义。视在功率定义为:

$$S = VI = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (3)$$

是电压的有效值与电流的有效值的乘积, 用来表示某些电气设备的容量。系统有功功率和视在功率的比值称为功率因数用 P_F 表示:

$$P_F = \frac{P}{S} \quad (4)$$

可用以衡量线路利用率。单相电路非正弦波形系统的有功功率、视在功率和功率因数的定义不存在任何异议。

1.2 单相系统非正弦波形下无功功率

单相电路非正弦波形下无功功率的定义一直存在争议, 经典的无功功率定义是 1927 年 Budeanu 提出的^[13]。

$$\begin{cases} Q_B = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \theta_h = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = Q_1 + Q_{BH} \\ Q_{BH} = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \theta_h \end{cases} \quad (5)$$

该式表示各次同频率电压电流产生的无功功率之和, 可以看成正弦波形情况下无功功率定义的延伸, 与非正弦情况下有功功率的定义 (2) 有一致性。

在正弦条件下, 有功功率、无功功率和视在功率满足三角关系 $S^2 = P^2 + Q_B^2$ 。但是在非正弦条件下, 以上三角关系式不再成立, 为了使表达式与正弦条件下一致, Budeanu 引入了一个新的畸变功率 D_B 使得 $S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2$, D_B 表示不同频率的电压和电流产生的畸变无功功率。现场测量存在 $Q_{BH} < 0$ 情况使得 $Q_B < Q_1$, 所以用 Q_B 量化谐波无功功率存在局限, 因此 D_B 的引入也存在相同局限^[14]。

2 三相非平衡系统算术、矢量视在功率及功率因数定义

三相系统的有功功率和无功功率都可用各相有功功率和无功功率代数求和求得。即 $P = P_a + P_b + P_c$

或者 $Q = Q_a + Q_b + Q_c$ 。

利用 Budeanu 的分解, 可以将算术视在功率 S_A 和矢量视在功率 S_V 写成:

$$S_A = S_a + S_b + S_c, \quad S_V = \sqrt{P^2 + Q_B^2 + D_B^2} \quad (6)$$

式中: $S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_{Ba}^2 + D_{Ba}^2}$, $S_b = \sqrt{P_b^2 + Q_{Bb}^2 + D_{Bb}^2}$, $S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_{Bc}^2 + D_{Bc}^2}$, $P = P_a + P_b + P_c$, $Q_B = Q_{Ba} + Q_{Bb} + Q_{Bc}$, $D_B = D_{Ba} + D_{Bb} + D_{Bc}$ 。

相对应的两个功率因数如下:

$$P_{FA} = \frac{P}{S_A}, \quad P_{FV} = \frac{P}{S_V} \quad (7)$$

3 算术视在功率和矢量视在功率的局限性分析

三相平衡系统中如图 1 所示, 电压源三相正弦对称, 线电压 $U_1 = 110 \text{ kV}$, 线路阻抗 $Z_1 = r_1 + j l_1 = 10.5 + j38.3 \Omega$, 三相负载为三个等值电阻 $R_i = 5 \times 10^3 \Omega$, $i = a, b, c$ 。根据式 (2) 和三相有功功率的计算公式计算得 $P = 2.40 \text{ MW}$, 根据式 (3) 和三相视在功率关系得 $S_A = S_V = 2.40 \text{ MVA}$, 相应的功率因数 $P_{FA} = P_{FV} = 1.0$, 线路损耗 $P_1 = r_1 (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) = 5.06 \text{ kW}$ 。

视在功率和线路损耗存在关系 $P = r(S/V)^2 + V^2/R_M$, 其中 r 为等效串联电阻, R_M 为并联等效电阻, V 负载端线电压, S 负载端视在功率^[7]。在图 1 示电路中, 为简单先不考虑变压器, 所以线路损耗 $P = r_1 (S/V)^2$, 其中 r_1 表示线路等效电阻, 由 $P = r_1 (S/V)^2$ 计算得到 $P = 5.06 \text{ kW}$ 。

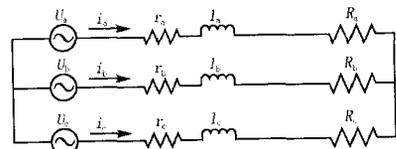


图 1 三相三线平衡系统

Fig 1 Three-phase three-line balanced system

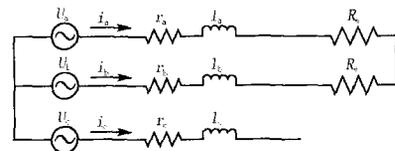


图 2 三相三线非平衡系统

Fig 2 Three-phase three-line unbalanced system

当系统不平衡但传输相同有功功率时如图 2 所示, 此时负载 $R_c = R_a/2 = 2.5 \times 10^3 \Omega$, 视在功率 $S_A = S_V = 2.40 \text{ MVA}$, 功率因数 $P_{FA} = P_{FV} = 1.0$ 。线

路损耗 $P_l = r(I_a^2 + I_b^2) = 10.08 \text{ kW}$ 是系统平衡时线损的两倍,但由视在功率计算得到的 $P = 5.06 \text{ kW}$ 不等于实际线路损耗 10.08 kW 。

当三相系统平衡时,算术和矢量视在功率能很好地估计线路损耗,当三相系统不平衡时,算术和矢量视在功率没有变,但是线路损耗接近平衡时的两倍,此时算术和矢量视在功率的平方与线路损耗不再满足线性关系,用这两个视在功率不能正确估计线路损耗,这就违背了前面所述的电力系统中线路损耗 P 和视在功率 S 的平方近似满足线性关系

$P = a + bS^2$ 这一特性。三相系统在传输能量时,不能看作三条单独的传输线而是作为一个整体,功率因数反映线路利用率,功率因数 $P_F = 1.0$ 意味着在传输一定有功率时,线路损耗为最小可能值。三相系统平衡时,功率因数 $P_F = 1.0$,在系统不平衡时,计算得到的功率因数依然是 1,而不平衡系统已经不再是传输电能的最优系统,可见算术和矢量视在功率在系统不平衡时也影响了功率因数的正确计算。

4 三相非平衡负载系统中有效视在功率和功率因数的定义

IEEE 试行标准 1459-2000 中使用了有效视在功率 S_e 的定义^[14],即保持系统有功功率损耗不变,将实际三相不平衡系统等效成三相平衡系统,得到两个等效电量 V_e 、 I_e ,则三相系统的有效视在功率定义为

$$S_e = 3V_e I_e \quad (8)$$

其中三相三线系统中:

$$\begin{cases} I_e = \sqrt{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} / \sqrt{3} \\ V_e = \sqrt{(V_{aN}^2 + V_{bN}^2 + V_{cN}^2)} / \sqrt{3} \end{cases} \quad (9)$$

在实际应用中为避免利用人工中性点 N 测量带来的麻烦可用下式代替式 (9) 中等效电压^[8]。

$$V_e = \sqrt{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)} / \sqrt{9} \quad (10)$$

有效视在功率对应的功率因数用 P_{Fe} 表示

$$P_{Fe} = \frac{P}{S_e} \quad (11)$$

用有效视在功率定义重新计算第 3 部分的算例,当系统平衡时, $S_e = 2.40 \text{ MVA}$, $S_e = S_A = S_V$, $P_{Fe} = P_{FA} = P_{FV} = 1.0$,由 S_e 计算得到 $P = 5.06 \text{ kW}$ 。当系统不平衡时, $S_e = 3.39 \text{ MVA}$, $P_{Fe} = 0.707$,由 S_e 计算得到 $P = 10.33 \text{ kW}$ P_1 ,可见有效视在功率的平方能满足与线损的线性关系。

设系统平衡时视在功率是 S_0 、线路损耗是 P_0 ,

当三相系统 c 相电阻 $R_c = (0.2 \sim 4.0) R_a$ 时,归一化线损 $P_{A,V} / P_0 = f(S_{A,V}^2 / S_0^2)$ 与 $P_e / P_0 = f(S_e^2 / S_0^2)$ 的相对误差曲线如图 3。由图 3 可知,只有在三相系统平衡时,算术和矢量视在功率与有效视在功率的误差为 0,在系统非平衡时,算术和矢量视在功率都不能正确估计线路损耗。

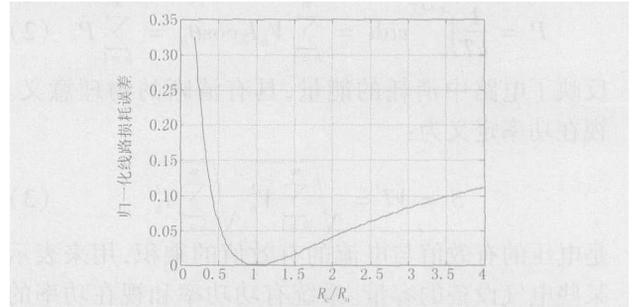


图 3 归一化线路损耗误差与可变电阻 R_c 函数关系

Fig 3 Error of normalized power loss and the variable resistance R_c

5 仿真试验

牵引供电系统中如果将牵引电力网看作三相系统,则系统为三相不平衡系统,其中、供电臂可看作三相系统的 a、b 相,接地线为 c 相,牵引电力网就构成一个 a、b、c 三相不对称的系统。下面以德昌牵引变电所实测数据进行仿真试验。数据的相位来自参考文献 [15]。

表 1 德昌变电所、供电臂电压、电流各次谐波分量 (2001 年 8 月 15 号)

Tab 1 Harmonic components of traction current and voltage of Dechang traction substation

h	1	3	5	7	9	11
V_h / kV	29.296	0.391	0.802	0.548	0.404	0.401
h / deg	-2.04	-159	148	97.6	-120.1	87.24
I_h / A	103.853	22.799	10.972	5.596	3.384	2.381
h / deg	-28.4	-66.7	-117	-165	-16.11	-141.8
V_h / kV	29.015	0.488	0.881	0.691	0.548	0.575
h / deg	-63.84	-167	165	118	-169.2	-158.6
I_h / A	137.831	28.133	13.728	7.259	4.605	3.581
h / deg	-89.2	-77.5	-101.3	-148.4	-70.25	-86.0

根据表 1 数据计算得三相总有功功率 $P = 6.34 \text{ MW}$, 视在功率和功率因数计算结果见表 2。

表 2 按照不同定义计算的视在功率和功率因数

Tab 2 Apparent powers and power factors according to different definitions

	有效值	算术值	矢量值
视在功率 S / MVA	8.13	7.26	7.26
功率因数 P_F	0.7799	0.8733	0.8734

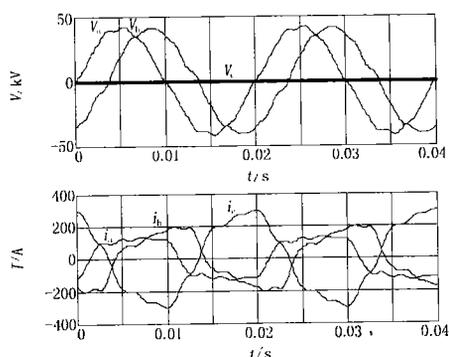


图4 牵引网三相系统电压电流波形

Fig 4 Line currents and line-to-neutral voltages waveforms of traction network

因为牵引供电系统的计量点在牵引变压器高压侧,而上述测量数据是变压器低压侧数据,为此建立了一个 110 kV/27.5 kV 的 YN, d11 牵引变压器模型,其中变压器容量 $S_N = 50$ MVA,额定短路损耗 $P_d = 156.3$ kW,忽略变压器空载损耗。将低压侧数据换算到高压侧进行计算得到线损的实际值 $P_l = 54.40$ kW,视在功率和功率因数及由视在功率计算得到的线损结果见表 3,三相系统电压电流波形见图 5。

表 3 牵引变压器高压侧的视在功率和功率因数

Tab 3 Primary apparent powers and power factors of traction transformer

	有效值	算术值	矢量值
视在功率 S /MVA	8.31	7.56	7.14
功率因数 P_F	0.7632	0.8388	0.8883
线损/kW	54.40	45.03	40.16
线损误差	0.00	-17.22%	-26.17%

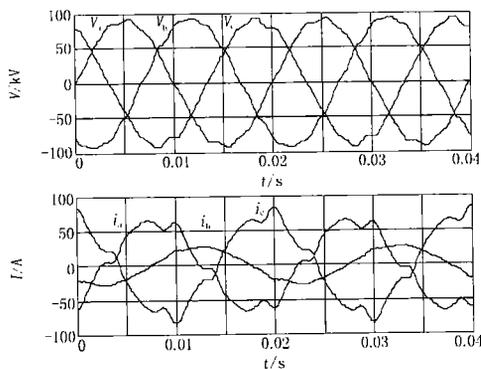


图5 牵引变压器高压侧电压电流波形

Fig 5 Primary line currents and line-to-neutral voltages waveforms of traction transformer

有效视在功率对应的功率因数 P_{Fe} 在高、低压侧不同是由牵引变压器的损耗造成的可忽略不计。但

功率因数 P_{Fe} 比广泛使用的功率因数 P_{Fa} 和 P_{Fv} 在牵引变压器低压侧相差 9.3 个百分点,而在高压侧分别相差 7.6 和 12.5 个百分点。

6 结论

随着电力系统波形越来越严重的畸变和不对称,线电压和相电压不再满足 $\sqrt{3}$ 倍的关系,算术视在功率和矢量视在功率计算公式 $S = 3V_{LN} I = \sqrt{3}V_{LL} I$,使得这两个视在功率估计系统损耗时不能得到准确结果。在系统电压电流波形存在畸变时这两个定义不再满足现代电力系统分析的要求。IEEE1459-2000 推荐使用的有效视在功率定义,是基于用户使用电能计费、工程经济决策和主要谐波污染测量的,是根据线损和视在功率平方之间 $P = a + bS^2$ 的关系式推导出的,无论在三相正弦系统还是非正弦系统、负载平衡还是非平衡情况下都能很好地满足视在功率这一特性。由仿真试验也可看出,在牵引供电系统引起电力系统不对称和造成谐波污染的情况下,不同视在功率定义得到的功率因数结果相对误差较大,而使用 IEEE1459-2000 试行标准中有效视在功率的定义能准确的估计线路损耗,对电力系统经济运行、无功优化和补偿研究具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 刘进军,王兆安. 瞬时无功功率与传统功率理论的统一数学描述及物理意义 [J]. 电工技术学报, 1998, 13(6): 6-12
L U Jin-jun, WANG Zhao-an Uniform Mathematical Description of Instantaneous Reactive Power Theory and Conventional Power Theory and Its Physical Meaning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(6): 6-12
- [2] 张代润. 关于非正弦三相不平衡电路的瞬时无功功率理论 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 26-28
ZHANG Dai-run About Instantaneous Reactive Power Theory in Non-sinusoidal Asymmetrical Circuits [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4): 26-28
- [3] 刘进军,王兆安. 基于旋转空间矢量分析瞬时无功功率理论及其应用 [J]. 电工技术学报, 1999, 14(1): 49-54
L U Jin-jun, WANG Zhao-an Analysis of Theory and Application of Instantaneous Power Based on Space Vector Method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(1): 49-54
- [4] Ferrero A, Superti-Furga A. A New Approach to the Definition of Power Components in Three-phase Systems Un-

- der Non-sinusoidal Conditions [J]. IEEE Trans on Instr Meas, 1991, 40 (3): 568-577.
- [5] Emanuel A E. On the Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Poly Phase Circuits with Sinusoidal Voltage and Currents [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 18 (3): 841-852.
- [6] Filipski P S. Polyphase Apparent Power and Power Factor under Distorted Waveform Conditions [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6 (3): 1161-1165.
- [7] 张旭俊. 非正弦波形下各种无功功率定义的本质 [J]. 电测与仪表, 2004, (1): 1-9.
ZHANG Xu-jun. Essence of Reactive Power Definitions in Nonsinusoidal Conditions [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, (1): 1-9.
- [8] Emanuel A E. The BUCHHLZ-GOODHUE Apparent Power Definition: the Practical Approach for Non-sinusoidal and Unbalanced Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8 (3): 841-852.
- [9] 殷波, 陈允平. abc坐标下广义无功电流和功率的定义及补偿 [J]. 电网技术, 2003, 27 (7): 43-46.
YN Bo, CHEN Yun-ping. Definition and Compensation of Generalized Instantaneous Reactive Current and Reactive Power in abc Coordinates [J]. Power System Technology, 2003, 27 (7): 43-46.
- [10] 王学伟, 高朝. 畸变波形下功率定义问题的探讨 [J]. 电网技术, 2004, 28 (23): 17-21.
WANG Xue-wei, GAO Zhao. A Research on Power Definition under Distorted Wave [J]. Power System Technology, 2004, 28 (23): 17-21.
- [11] Emanuel A E. Apparent Power Definitions for Three-Phase Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14 (3): 767-772.
- [12] 黄益庄. 变电站综合自动化技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000. 94-97.
HUANG Yi-zhuang. Integrated Automatization Technology of Transformer Substation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000. 94-97.
- [13] Emanuel A E. Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 40 (3): 869-876.
- [14] Power System Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions [S].
- [15] 陈维荣. 神经网络及小波变换在牵引供电系统馈线故障检测中的应用研究 (博士学位论文) [D]. 成都: 西南交通大学, 1998.
CHEN Wei-rong. Study on Applications of Neural Networks and Wavelet Transform in Feeder Fault Detection of Traction Supply System, Doctoral Dissertation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1998.

收稿日期: 2005-12-21; 修回日期: 2006-04-07

作者简介:

黄晓青 (1979 -), 女, 硕士, 从事电力系统测量方面的研究; E-mail: xqhuang@mars.swjtu.edu.cn

王晓茹 (1962 -), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护与安全稳定控制、变电站自动化技术方面的研究。

On apparent power of unbalanced non-sinusoidal electric power system

HUANG Xiao-qing, WANG Xiao-ru, WANG De-lin, ZHANG Li

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Currents and voltages waveforms of electric power system are distorted by the nonlinear loads proliferation. Though definition of active power already undoubtedly confirmed in non-sinusoidal conditions, apparent power is still questionable which leads to different results of power factor. This paper analyzes two definitions extensively used in industry of arithmetic apparent power and vector apparent power, and effective apparent power recommended by the IEEE 1459-2000 Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. The limitations of the two traditional definitions and the improvements of effective apparent power in the IEEE Trial-Use Standard are pointed out according to the relation between the lines power loss and apparent power. And at the meantime, the power supply system of traction is regarded as an unbalanced three-phase system to do simulation testing using the data proved by Dechang substation of traction. The error of data calculated from different definitions of apparent power is discussed. It is proved that the definition of effective apparent power recommended by the IEEE Trial-Use Standard is more scientific and practical.

Key words: non-sinusoid; imbalance; apparent power; power factor; electric power system