

基于等效的视在功率计算新方法

田铭兴^{1,2}, 赵远鑫^{1,2}, 王江彬^{1,2}

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 在电力系统电压、电流波形畸变和不对称的条件下, 目前视在功率求解还没有一种认可的方法, 导致功率因数计算数值不一致。针对该问题, 首先详细分析影响电能传输的因素, 然后采用拉格朗日乘法推导分析一种单等效视在功率计算方法, 最后在考虑影响电能传输的不同因素条件下将所提方法分别与矢量视在功率、算数视在功率、双等效视在功率进行对比分析, 以研究不同视在功率实际应用特性。算例结果表明, 所提方法能够体现不同不利因素对电能传输的影响, 且影响程度越大, 功率因数越小。

关键词: 电力系统; 电能传输; 拉格朗日乘法; 单等效视在功率; 功率因数

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.021

0 引言

在电气工程领域, 工程研究人员非常关注视在功率以及与其相关的功率因数计算问题, 因为这是功率因数校正、谐波和无功功率补偿、设备定容等工作的重要理论基础。然而, 随着电力系统不对称和非线性化日益严重, 导致在单相正弦及三相正弦对称条件下建立的传统功率理论失去其有用性^[1-2], 给视在功率和功率因数计算的准确性带来困扰。

1927 年罗马尼亚电气工程师 Budeanu 首次提出了单相非正弦条件下视在功率计算方法^[3]: $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$, P 表示有功功率, Q 表示无功功率, D 表示畸变功率。尽管 Budeanu 理论受到一些争议, 如未对定义的各功率量进行物理解释, 引入的畸变功率没有物理意义, 只是为了满足视在功率、有功功率、无功功率之间的关系, 不能提供设计补偿电路的信息等^[4-5], 但因为满足能量守恒定理, 所以仍得到相关学者的支持。其中, H. Curtis 和 F. Silsbee 两位学者将 Budeanu 理论中有关视在功率计算方法推广至三相系统, 从而形成算数视在功率 S_A ^[6] 和矢量视在功率 S_V ^[6]。在正弦对称系统中, 由于 S_A 和 S_V 能够较好地应用于工程实践, 所以被收录于 1941 年出版的“美国电气量标准定义”中并沿用至今^[7], 因此两者概念深入人心。但在谐波和不对称条件下, 由于 S_A 和 S_V 的计算结果存在差异, 给功率因数选择与校正、无功和谐波补偿带来许多困扰^[1,8], 因此,

需对视在功率做进一步深入研究。1920 年 W. V. Lyon 提出的关于视在功率及功率因数观点被认为是真正意义上揭示了其内涵。W. V. Lyon 认为: “保持负载电压和电流有效值不变, 负载可能吸收的最大有功功率即为视在功率。功率因数是实际有功功率与此最大有功功率的比值”^[9-10]。遗憾的是, 由于同一时期 C. L. Fortescue 提出的对称分量法占据电气领域的重心^[10], 该观点未能得到足够的重视。从 20 世纪中后期开始, 随着系统非正弦、不对称问题日益严重, W. V. Lyon 的观点才逐渐得到有关学者的关注, 对更具普适性的视在功率及功率因数求解问题做了大量科学研究^[11-15]。其中, 美国电子与电气工程师协会 (IEEE) 非正弦研究组总结多年来功率理论研究成果推出的 IEEE Std 1459—2010 标准中的双等效视在功率倍受推崇^[8,16]。

电力系统中, 功率因数是用来衡量用电设备 (指广义的设备, 包括电网中变压器、输电线路、实际负载等) 效率的一个重要技术数据, 在数值上等于有功功率与视在功率的比值。从功率理论的发展历程来看, 有功功率的定义和认识比较统一, 因此视在功率计算结果直接决定功率因数的大小。当电能在传输过程中受到不利因素影响时, 会增大线路损耗从而导致电能传输效率降低, 这种变化情况应该能够通过功率因数的变化表现出来。通过此特征, 可验证视在功率计算的合理性。本文首先详细分析了影响电能传输、引起功率因数降低的具体因素; 然后, 在充分研读前人工作的基础上, 详细推导分析了一种单等效视在功率计算方法; 最后, 从功率因数变化情况角度出发, 通过具体示例与其他已有视在功率进行对比分析, 从而明确不同视在功率的实际应用特性。

收稿日期: 2016-09-10; 修回日期: 2017-05-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51367010, 51167009); 甘肃省科技计划资助项目 (1304WCGA181); 兰州市科技计划项目资助 (2013-4-111)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51367010, 51167009), Science and Technology Program of Gansu Province (1304WCGA181) and Science and Technology Program of Lanzhou City (2013-4-111)

1 影响电能传输效率的因素分析

对于电力部门而言,总是希望电源发出的电能尽可能多地为负载所用,保持高效率传输。这样既节约能源,同时也降低发电设备的容量,提高经济效益。但在实际电能传输特别是远距离输电的情况下,线路损耗不容忽视。可以用电能传输效率来衡量线路损耗情况,如式(1)所示。

$$\eta = \frac{\text{电源发出电能} - \text{线路损耗}}{\text{电源发出电能}} \times 100\% \quad (1)$$

输电系统示意图如图 1 所示, e_a, e_b, e_c 为电源相电压; $r_m (m = a, b, c, n, \text{下同})$ 为线路损耗电阻; x_m 为线路电抗; i_{mL} 为各相及中性线电流; u_m 为负载侧各相及中性线相对于参考点的电压,参考点的选取应满足条件 $u_a + u_b + u_c + u_n = 0$ 。

在电力系统中,通常电压的波形畸变很小,而电

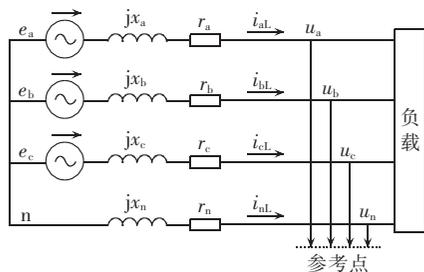


图 1 输电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of transmission system

流波形畸变可能很大。因此,研究电压波形是正弦波、电流波形是非正弦波的情况有很大的实际意义^[17]。以下分析中忽略电压的谐波影响。

设三相及中性线瞬时线电流如式(2)所示,相应可列出三相及中性线上电流有效值的表达式。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{aL} \\ i_{bL} \\ i_{cL} \\ i_{nL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_+ \sin(\omega t + \phi_+) + \sqrt{2} I_- \sin(\omega t + \phi_-) + \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + \phi_0) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_{aLh} \sin(h\omega t + \phi_{aLh}) \\ \sqrt{2} I_+ \sin(\omega t + \phi_+ - 120^\circ) + \sqrt{2} I_- \sin(\omega t + \phi_- + 120^\circ) + \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + \phi_0) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_{bLh} \sin(h\omega t + \phi_{bLh}) \\ \sqrt{2} I_+ \sin(\omega t + \phi_+ + 120^\circ) + \sqrt{2} I_- \sin(\omega t + \phi_- - 120^\circ) + \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + \phi_0) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_{cLh} \sin(h\omega t + \phi_{cLh}) \\ 3\sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + \phi_0) + \sum_{h=2}^{\infty} [\sqrt{2} I_{aLh} \sin(h\omega t + \phi_{aLh}) + \sqrt{2} I_{bLh} \sin(h\omega t + \phi_{bLh}) + \sqrt{2} I_{cLh} \sin(h\omega t + \phi_{cLh})] \end{bmatrix} \quad (2) \\ I_{aL} = \sqrt{I_+^2 + I_-^2 + I_0^2 + 2I_+ I_- \cos(\phi_+ - \phi_-) + 2I_+ I_0 \cos(\phi_+ - \phi_0) + 2I_- I_0 \cos(\phi_- - \phi_0) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{aLh}^2} \\ I_{bL} = \sqrt{I_+^2 + I_-^2 + I_0^2 + 2I_+ I_- \cos(\phi_+ - \phi_- + 120^\circ) + 2I_+ I_0 \cos(\phi_+ - \phi_0 - 120^\circ) + 2I_- I_0 \cos(\phi_- - \phi_0 + 120^\circ) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{bLh}^2} \\ I_{cL} = \sqrt{I_+^2 + I_-^2 + I_0^2 + 2I_+ I_- \cos(\phi_+ - \phi_- - 120^\circ) + 2I_+ I_0 \cos(\phi_+ - \phi_0 + 120^\circ) + 2I_- I_0 \cos(\phi_- - \phi_0 - 120^\circ) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{cLh}^2} \\ I_{nL} = \sqrt{9I_0^2 + \sum_{h=2}^{\infty} (I_{aLh}^2 + I_{bLh}^2 + I_{cLh}^2)} \end{cases}$$

其中, I_+, I_-, I_0 分别为基波电流正、负、零序分量有效值; ϕ_+, ϕ_-, ϕ_0 分别为基波电流正、负、零序分量相移角; h 为谐波次数; $\phi_{aLh}, \phi_{bLh}, \phi_{cLh}$ 为 h 次谐波电流相移角。

若令 $r_a = r_b = r_c = r$, 可得输电线路损耗功率为:

$$\begin{aligned} \Delta P &= r(I_{aL}^2 + I_{bL}^2 + I_{cL}^2) + \rho_n I_{nL}^2 = \\ &= 3rI_+^2 [1 + k_-^2 + (1 + 3\rho_n)k_0^2] + \\ &= rI_+^2 (1 + \rho_n) (\text{THP}_a^2 + \text{THP}_b^2 + \text{THP}_c^2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\text{THP}_m = \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{mLh}^2} / I_+ \right) \times 100\%$; $\rho_n = \frac{r_n}{r}$; $k_- = \frac{I_-}{I_+}$; $k_0 = I_0 / I_+$ 。

式(3)给出了三相电流非正弦、不对称情况下输电线路损耗的表达式,据此还可以得到以下比较典型情况下的输电线路损耗。

a. 三相电流正弦对称, $k_- = k_0 = \text{THP}_m = 0$, 输电线路损耗为:

$$\Delta P = 3rI_+^2$$

b. 三相电流不含谐波但不对称, $\text{THP}_m = 0$, 输

电线路损耗为:

$$\Delta P = 3rI_+^2 [1 + k_-^2 + (1 + 3\rho_n)k_0^2]$$

c. 三相电流含谐波但基波正弦对称, $k_- = k_0 = 0$, 输电线路损耗为:

$$\Delta P = 3rI_+^2 + rI_+^2 (1 + \rho_n) (\text{THP}_a^2 + \text{THP}_b^2 + \text{THP}_c^2)$$

可见,只有三相电流正弦对称时线路损耗最小,电流非正弦、不对称均会增大输电线路损耗。由式(1)可知,这将降低电能传输效率,引起功率因数的下降。

另外,在图 1 中,当三相输电线路参数不对称(即三相线路损耗电阻不相等)时,可将线路损耗电阻 r_m 归于负载侧与实际负载组成总负载。 r_m 不相等使得总负载不对称,从而引起三相电流不对称,影响电能传输效率。此外,当三相电流不对称时还会导致输电线上压降不同,引起负载侧电压不对称。

2 单等效视在功率计算方法

以 W. V. Lyon 的思想为基础,推导分析一种视

在功率计算方法:保持负载侧电压不变,在保证线路损耗不变的约束条件下调节线路电流使负载和电流调节网络获得的有功功率最大,此时最大有功功率等于负载的视在功率。因为此方法中只对实际电流做了等效处理,所以称之为“单等效法”。

图1中输电线路损耗为:

$$\Delta P' = r_a I_{aL}^2 + r_b I_{bL}^2 + r_c I_{cL}^2 + r_n I_{nL}^2 \quad (4)$$

其中, I_{mL} 为各相及中性线电流有效值。

在保证负载侧电压和线路损耗不变的约束条件下调节线路电流,如图2所示。设调节后各相及中性线电流为 I_m 。

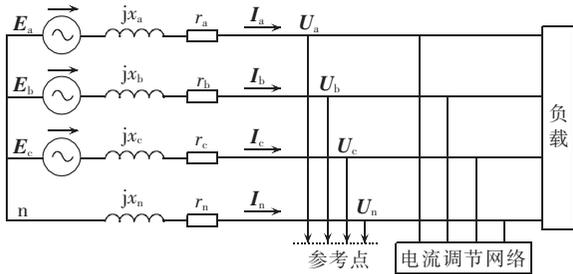


图2 调节输电电流示意图

Fig.2 Schematic diagram of transmission current regulation

需要注意的是,图2是一个“等效”电路,目的是使负载和电流调节网络获得的最大有功功率与图1中负载视在功率相等,但不能仅仅只是数值上的相等,还要保证电流调节前后负载运行情况以及对电路的影响相同。

补偿调节后电源传输给负载和电流调节网络的有功功率为:

$$P = \text{Re}(U_a I_a^* + U_b I_b^* + U_c I_c^* + U_n I_n^*) = \frac{1}{2} \left(\sum_m U_m I_m^* + \sum_m U_m^* I_m \right) \quad (5)$$

系统线路损耗为:

$$\Delta P = r_a I_a^2 + r_b I_b^2 + r_c I_c^2 + r_n I_n^2 \quad (6)$$

其中, I_m 为调节后各相及中性线电流有效值。

根据约束条件电流调节前后系统线路损耗应保持不变:

$$\Delta P' = \Delta P \quad (7)$$

根据基尔霍夫电流定律(KCL),有:

$$I_a + I_b + I_c + I_n = 0 \quad (8)$$

至此,对式(5)求最大有功功率问题可转化为满足式(7)和式(8)约束条件下函数求极大值的数学问题。可用拉格朗日乘数法来进行求解^[18]。

求解函数为:

$$P(I_m, I_m^*) = \frac{1}{2} \left(\sum_m U_m I_m^* + \sum_m U_m^* I_m \right)$$

约束条件:

$$H(I_m, I_m^*): \Delta P' = \Delta P \quad (9)$$

$$L(I_m, I_m^*): \sum_{m=a,b,c,n} I_m = 0 \quad (10)$$

构造拉格朗日函数:

$$F(I_m, I_m^*) = 2P(I_m, I_m^*) - \lambda H(I_m, I_m^*) - \delta L(I_m, I_m^*) \quad (11)$$

其中, λ, δ 为拉格朗日乘子。

对式(11)中 I_m^* 求偏导并使之为零,然后联立方程(9)、(10)解得:

$$I_m = \frac{U_m - \delta}{\lambda r_m} \quad (12)$$

$$\delta = \frac{r_b r_c r_n U_a + r_a r_c r_n U_b + r_a r_b r_n U_c + r_a r_b r_c U_n}{r_b r_c r_n + r_a r_c r_n + r_a r_b r_n + r_a r_b r_c} \quad (13)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_m \frac{|U_m - \delta|^2}{r_m}}{\sum_m r_m I_{mL}^2}} \quad (14)$$

式(12)为负载能够获得最大有功功率(即单等效法视在功率)的电流值。式(13)反映输电线路参数和负载侧电压对电能传输的影响,当且仅当三相线路参数和负载侧电压均对称时 $\delta=0$ 。为使视在功率的求取情况更加清晰,根据约束条件和式(12)表达式,可将图2等效为如图3所示电路。

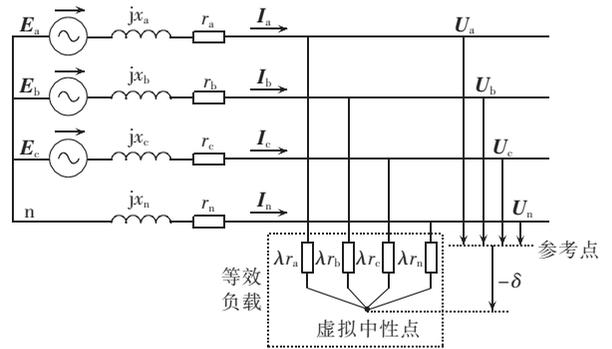


图3 负载获得最大有功功率电路

Fig.3 Circuit diagram of load with maximum active power

图3中,等效负载的有功功率为:

$$P_{\max} = S_{e1} = \sum_m \frac{|U_m - \delta|^2}{\lambda r_m} \quad (15)$$

其中, S_{e1} 为单等效视在功率。

将式(14)代入式(15)中化简得:

$$S_{e1} = \sqrt{\frac{\sum_m (r_m I_{mL}^2) \sum_m \frac{|U_m - \delta|^2}{r_m}}{\sum_m (\rho_m I_{mL}^2) \sum_m \frac{|U_m - \delta|^2}{\rho_m}}} \quad (16)$$

其中, $\rho_m = \frac{r_m}{r_e}$, r_e 为线路的等效电阻,一般取 $r_e = (r_a + r_b + r_c)/3$ 。

单等效法功率因数为:

$$C_{\text{PF}e1} = \frac{P}{S_{e1}} \quad (17)$$

当 $\rho_a = \rho_b = \rho_c = 1$, 负载侧电压和线电流正弦对称且无相位差时,电路的运行是最优的,此时图3电路和

图 1 实际电路完全对应,等效负载即为实际负载。此时若设负载侧电压和线电流有效值分别为 U 和 I ,可得负载有功功率 $P=3UI$,单等效视在功率 $S_{el}=3UI$ 。这也说明在最优电路情况下负载有功功率和单等效视在功率相等,符合实际情况。

3 示例分析

根据本文推导单等效视在功率以及目前已有算法、矢量法、IEEE Std 1459—2010 中双等效法^[7]等视在功率计算方法(已有多篇文献阐述,这里不再赘述),在制约电能传输的不同因素影响下对比功率因数变化情况,从而明确何种视在功率计算方法更加准确。

3.1 示例 1

假设一个三相四线制系统,以中性线为参考点,负载侧三相电压正弦对称:

$$\begin{cases} U_{an}=U\angle 0^\circ \\ U_{bn}=U\angle 240^\circ \\ U_{cn}=U\angle 120^\circ \\ U_n=0 \end{cases}$$

线路参数为: $\rho_a=\rho_b=\rho_c=\rho_n=1$ 。负载情况如图 4 所示,设 $x=\Delta R_Y/R_Y(0\leq x<1)$ 代表星形连接负载不对称程度, $y=\Delta R_\Delta/R_\Delta(0\leq y<1)$ 代表三角形连接负载不对称程度。

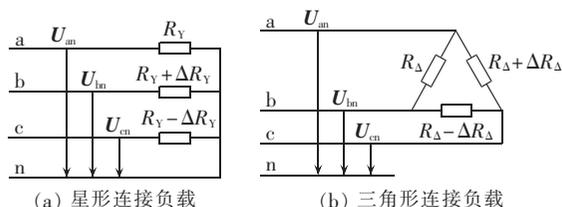


图 4 示例 1 中负载电路

Fig.4 Load circuits of Example 1

根据不同的方法进行视在功率和功率因数计算,结果如表 1 和表 2 所示,表中 $A=\frac{2}{3}x^4+x^2+1, B=(1-y)\sqrt{3y^2+9y+9}+(1+y)\sqrt{3y^2-9y+9}+\sqrt{3y^2+9}, C=2y^4-3y^2+9$ 。

2 种负载情况下功率因数随负载不对称程度变化的曲线如图 5 和图 6 所示。

负载不对称引起三相电流不对称,给电能传输带来不利影响。随着 x, y 值的增大,双等效法功率

表 1 星形连接负载计算结果

Table 1 Calculative results for star-connected loads

计算方法	视在功率	功率因数	计算方法	视在功率	功率因数
矢量法	$\frac{U^2}{R_Y} \frac{3-x^2}{1-x}$	1	双等效法	$\frac{3U^2}{R_Y} \sqrt{\frac{A}{(1-x^2)^2}}$	$\frac{3-x^2}{3\sqrt{A}}$
算数法	$\frac{U^2}{R_Y} \frac{3-x^2}{1-x}$	1	单等效法	$\frac{3U^2}{R_Y} \sqrt{\frac{A}{(1-x^2)^2}}$	$\frac{3-x^2}{3\sqrt{A}}$

表 2 三角形连接负载计算结果

Table 2 Calculative results for delta-connected loads

计算方法	视在功率	功率因数	计算方法	视在功率	功率因数
双等效法	$\frac{3U^2}{R_\Delta} \frac{\sqrt{C}}{1-y^2}$	$\frac{3-y^2}{\sqrt{C}}$	单等效法	$\frac{3U^2}{R_\Delta} \frac{\sqrt{C}}{1-y^2}$	$\frac{3-y^2}{\sqrt{C}}$
算数法	$\frac{U^2}{R_\Delta} \frac{B}{1-y^2}$	$\frac{9-3y^2}{B}$			

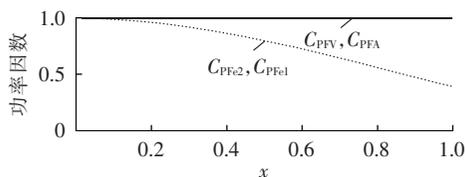


图 5 功率因数随星形负载不对称程度变化曲线图

Fig.5 Curve of power factor vs. asymmetry degree of star-connected loads

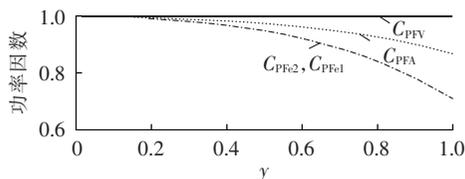


图 6 功率因数随三角形负载不对称程度变化曲线图

Fig.6 Curve of power factor vs. asymmetry degree of delta-connected loads

因数 C_{PF2} 和单等效法功率因数 C_{PFE1} 均逐渐减小,体现出负载不对称对电能传输效率带来的影响,在一定程度上可以反映电力系统的运行状态。而矢量视在功率因数 C_{PFV} 以及星形负载情况下算数视在功率因数 C_{PFA} 恒为单位 1。图 6 中, C_{PFA} 随负载不对称程度增加呈下降趋势,这是由于负载不对称使得电源产生并传输无功电流引起的;而 C_{PF2} 和 C_{PFE1} 在此基础上同时又反映出线路损耗对电能传输的影响,因此比 C_{PFA} 降幅大。通过本例可知,在不对称负载系统中,利用矢量法和算数法不能再合理地计算负载视在功率和功率因数。

3.2 示例 2

假设一个三相四线制系统,负载侧电压与示例 1 中相同。线路参数为: $\rho_a=1, \rho_b=1+\Delta\rho, \rho_c=1-\Delta\rho (-1<\Delta\rho<1)$,负载为星形连接纯阻性对称负载。

基于单等效视在功率和双等效视在功率计算的功率因数随 $\Delta\rho$ 变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可知, C_{PF2} 不随三相及中性线线路参数变化而改变,始终为单位 1;而 C_{PFE1} 随线路参数不对称程度的增大呈下降趋势,只有在 $\Delta\rho=0$ (三条相线规格参数相同)时等于单位 1。保持 $\Delta\rho$ 不变,不同 ρ_n 情况下 C_{PFE1} 有相同变化趋势,但 ρ_n 变大会增加输电线路损耗,从而导致 C_{PFE1} 进一步降低。本例说明, C_{PFE1} 能够敏感地反映输电线路参数变化对其产生的影响;而 C_{PF2} 未体现。因此,运用单等效法能获得

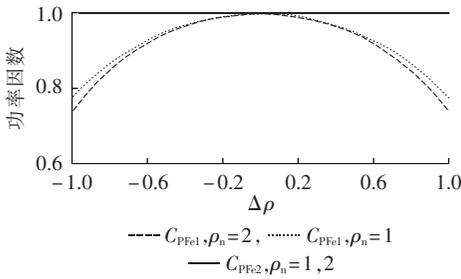


图 7 功率因数随线路参数变化曲线图

Fig.7 Curve of power factor vs. line parameter variation rate

更合理的计算结果,反映实际系统真实情况。

3.3 示例 3

假设一个三相四线制系统,负载为星形连接线性对称负载,相对于参考点的负载侧三相电压为:

$$\begin{cases} U_a = U_+ + \frac{1}{4}U_0 \\ U_b = \alpha^2 U_+ + \frac{1}{4}U_0 \\ U_c = \alpha U_+ + \frac{1}{4}U_0 \\ U_n = -\frac{3}{4}U_0 \end{cases}$$

其中, $\alpha = e^{j120^\circ}$, $\alpha^2 = e^{j240^\circ}$; U_+ 和 U_0 分别为正序电压和零序电压方均根值相量。

设线路参数为: $\rho_a = 0.8$ 、 $\rho_b = 1$ 、 $\rho_c = 1.2$, 变量 $\varepsilon_0 = U_0/U_+$ 表示不平衡电压中零序分量的含量。利用单等效视在功率和双等效视在功率计算出的功率因数随 ε_0 变化曲线如图 8 所示。

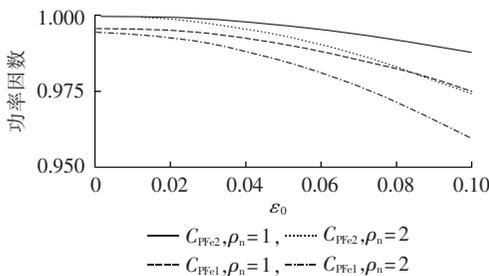


图 8 功率因数随零序电压不平衡度变化曲线图

Fig.8 Curve of power factor vs. imbalance degree of zero-sequence voltage

随着 ε_0 的增大,电压不对称程度变大, C_{PFe2} 和 C_{PFe1} 均逐渐减小,这说明电压不对称也对电能传输带来影响。当 $\varepsilon_0 = 0$ 时,三相电压只含有正序分量,但由于线路参数不对称,根据示例 2 的结果功率因数应小于单位 1,而基于双等效法得到的功率因数为单位 1,结果不尽合理。

若设线路参数 $\rho_a = \rho_b = \rho_c = 1$, $\varepsilon_0 = 0.3$, 功率因数随中性线参数 ρ_n 变化曲线如图 9 所示。可以看出,随着 ρ_n 增大, C_{PFe2} 和 C_{PFe1} 都逐渐减小。但当 $\rho_n = 0$ 时, $C_{PFe2} > 1$, $C_{PFe1} < 1$, 尽管此时负载和线路参数都对称,但功率因数不会大于单位 1。

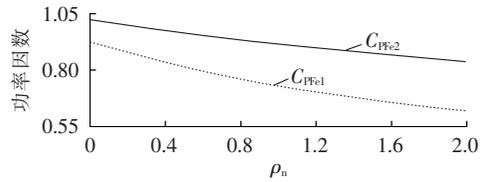


图 9 功率因数随中性线参数变化曲线图

Fig.9 Curve of power factor vs. neutral line parameter variation rate

4 结论

三相电流畸变和不对称、输电线路参数不对称、电压不对称等因素均会增大线路损耗,给电能传输带来不利影响,这些因素会引起电力系统中一个重要的技术数据——功率因数的减小。通过示例分析表明,电能传输不利因素未能引起基于矢量法和算术法计算的功率因数发生变化,在输电线路参数和负载侧电压不对称影响下,利用双等效法计算出的功率因数也不尽合理。

利用单等效视在功率求取的功率因数能够反映各种不利于电能传输的因素对其数值的影响。同时,只需知道负载侧电压、线电流及输电导线参数即可进行计算,方便工程应用。实际上,输电线路参数是基本对称的,在大多数由线电流引起(取决于负载情况)的畸变和不对称工况下,虽然双等效法和单等效法对视在功率的计算结果相差不大,但笔者认为使用单等效法进行视在功率和功率因数的求取更加准确和符合实际情况。

参考文献:

- [1] 肖湘宁,罗超,陶顺. 电气系统功率理论的发展与面临的挑战[J]. 电工技术学报,2013,28(9):1-10.
XIAO Xiangning, LUO Chao, TAO Shun. Development and challenges of power theory in electrical power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 1-10.
- [2] 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.
- [3] BUDEANU C I. Reactive and fictive powers[J]. Publication of the Rumanian National Institute, 1927, 3: 3-5.
- [4] CZANRECKI L S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1987, 36(3): 834-837.
- [5] 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 Xuewei, GAO Zhao. A research on power definition under distorted wave[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 17-21.
- [6] CURTIS H L, SILSBEE F B. Definitions of power and related

- quantities[J]. AIEE Transaction, 1935, 54: 394-404.
- [7] SWANN W F G. American standard definitions of electrical terms[S]. [S.l.]: Science, 1941.
- [8] Power System Instrumentation and Measurements Committee. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal balanced, or unbalanced conditions; IEEE Std 1459-2010[S]. [S.l.]: IEEE Power and Energy Society, 2010.
- [9] LYON W V. Discussion of power factor in poly-phase circuits[J]. AIEE Transaction, 1920, 39: 1515-1520.
- [10] EMANUEL A E. Summary of IEEE standard 1459: definition for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, or unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(3): 869-876.
- [11] EMANUEL A E. Apparent power definitions for three-phase system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 767-772.
- [12] FILIPSKI P S. Apparent power—a misleading quantity in the non-sinusoidal power theory[J]. European Transactions on Electrical Power Engineering, 1993, 3(1): 21-26.
- [13] FILIPSKI P S, BAGHZOUZ Y, COX M D. Discussion of power definitions contained in the IEEE dictionary[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1237-1244.
- [14] WILLENS J L. Reflections on apparent power and power factor in non-sinusoidal poly-phase situations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 835-840.
- [15] 黄晓青, 王晓茹, 王德林, 等. 非正弦非平衡电力系统视在功率研究[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34(12): 30-34.
HUANG Xiaqing, WANG Xiaoru, WANG Delin, et al. On apparent power of unbalanced non-sinusoidal electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2006, 34(12): 30-34.
- [16] IEEE Working Group in Non-sinusoidal Situation. Practical definitions for powers in systems with non-sinusoidal waveforms and unbalanced loads; a discussion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 79-87.
- [17] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 23-26.
- [18] 同济大学应用数学系. 高等数学(下册)[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 56-61.

作者简介:



田铭兴

田铭兴(1968—), 男, 甘肃武威人, 教授, 博士, 通信作者, 从事电力系统电能质量分析及其综合治理方面的研究(E-mail: tianmingxing@mail.lzjt.cn);

赵远鑫(1991—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 从事功率理论分析与应用方面的研究(E-mail: Zhaoyuanx826@163.com);

王江彬(1990—), 男, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 从事多端电路功率理论方面的研究(E-mail: 1550151867@qq.com)。

Apparent power calculation based on equivalent scheme

TIAN Mingxing^{1,2}, ZHAO Yuanxin^{1,2}, WANG Jiangbin^{1,2}

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Province Engineering Laboratory for Rail Transit Electrical Automation,

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Since there is no widely-acceptable method for calculating the apparent power of distorted or asymmetric voltage and current waveforms in power system, the calculated power factor is thus not consistent, aiming at which, the influencing factors of electric energy transmission are analyzed in detail and the single-equivalent apparent power calculation method derived from Lagrange multiplier method is proposed. With the consideration of different influencing factors, the proposed method is compared with the calculation methods of vector apparent power, arithmetic apparent power and double-equivalent apparent power respectively to research the practical application characteristics of different apparent powers. Case study shows that, the proposed method reflects the impacts of different unfavourable factors on electric energy transmission; the larger the impact is, the smaller the power factor will be.

Key words: electric power systems; electric energy transmission; Lagrange multiplier method; single equivalent apparent power; power factor