

交流低压电缆电压降计算与分析

AC Low-voltage Cable Voltage Drop Calculation and Analysis

刘高雄

Gaoxiong Liu

北京市一清百玛士绿色能源有限公司 中国·北京 101100

Beijing Yiqing Baimashi Green Energy Co., Ltd., Beijing, 101100, China

摘要: 交流低压电缆作为电力网络的一部分, 分布广泛、数量庞大。电缆中通过交流电流时, 因其自身内阻抗存在产生电压降, 导致动力设备端电压降低, 甚至影响设备工况, 所以必须对其产生原理及其对电气设备的影响具有深刻的认识, 并对其采取必要的改进措施。

Abstract: As a part of the power network, AC low-voltage cables are widely distributed and have a large quantity. When the cable passes through the AC current, the voltage drop produces by its own internal impedance, which causes the voltage reduction of the power equipment end, and even affects the working condition of the equipment. Therefore, we must have a deep understanding of its production principle and its impact on the electrical equipment, and take necessary improvement measures for it.

关键词: 交流低压电缆; 电压降; 影响; 改进措施

Keywords: AC low-voltage cable; voltage drop; impact; improvement measures

DOI: 10.12346/peti.v3i4.6439

1 引言

中国企业用户内部动力设备供电电缆多为额定交流电压 1000V 以下产品, 属于低压交流电缆。电缆是电能传输的介质及路径^[1]。电缆传输电能过程中, 因电缆自身结构、材质、环境因素、电源、负荷、敷设方式等因素影响, 交流电流在电缆中通过产生电压降且稍有差异。

2 三相平衡电力系统电缆电压降的计算

中国电缆芯线材质大多采用铝质和铜质两种, 不同材质在交流回路中产生阻抗不同。暂取电缆芯线材质为铜质三相电缆, 以图 1 配电系统为例加以分析。在电缆的实际运行中, 其内阻抗的计算需要考虑其电阻、感抗、容抗等因素。而感抗与容抗相位相反, 可以相互抵消, 且感抗值远大于容抗值, 以下计算中, 暂不考虑电缆的容抗^[2]。

2.1 电压降释义

电缆电压降指电流流经电缆所产生的电缆首末两端两节点电压的偏差。电流流经电缆单相导线, 因内阻抗 Z 的存

在产生电压降 ΔV , 设其电阻 R , 电抗 X , 电流 I , 电源电压 V_1 , 负荷端电压 V_2 , 据基尔霍夫定理可知:

$$V_1 - I(R + jX) - V_2 = 0$$

2.2 电缆单相线路等效电路

当图 1 动力系统处于稳态时, 单独考虑电缆部分, 根据戴维南定理, 电缆可以等效为电压源 ΔV 与内阻抗 Z 的并联电路, 电流 I , 见图 2。

$$\Delta V - I(R + jX) = 0$$

$$\text{因 } Z = R + jX$$

$$\Rightarrow \Delta V = IZ$$

2.3 电缆单相导线电压降计算

设负荷功率因素 $\cos \alpha$ 已知, 则可做出图 1 电力系统各物理量的向量图: 以水平方向为基准做线段 AB (向量 V_2); 沿 A 点逆时针旋转 α 电角度做线段 AH (向量 I), 连接 B 、 H 两点, 且 $BH \perp AH$; 以 B 点为基准点做线段 BF (向量 IR), 且 $BF \parallel AH$; 做线段 FC (向量 IX), 且 $FC \perp BF$; 连接线段 AC (向量 V_1)、 BC (向量 ΔV); 做线段 AB 延长线至点 E , 且线段 $CE \perp$ 线段 BE ; 经点 B 、点

【作者简介】刘高雄 (1972-), 男, 中国河北安国人, 从事电气应用研究。

E 分别做 BE 垂直线 BG、EJ，经点 F 做水平线，与 BG、EJ 分别相交于点 G、点 J，如图 3 所示。

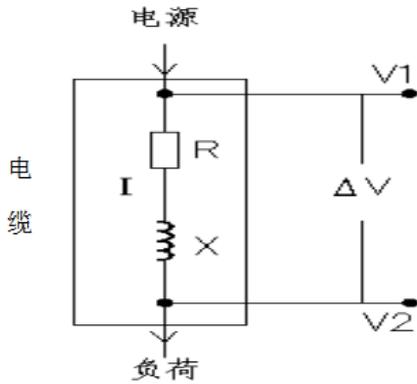


图 1

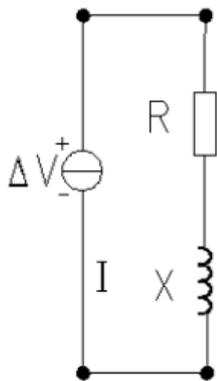


图 2

由图 3 可知，

$$\angle HAB = \angle FBD = \angle FCJ = \alpha$$

\vec{BF} 和 \vec{FC} 为 $\vec{\Delta V}$ 在负荷功率因数为 $\cos \alpha$ 时的两个电压分矢量 \vec{IR} 和 \vec{IX} ，得

$$\vec{BC} = \vec{BF} + \vec{FC}$$

\vec{BF} 和 \vec{EC} 可视为 $\vec{\Delta V}$ 水平方向和垂直方向的两个电压分量，得

$$\vec{BC} = \vec{BE} + \vec{EC}$$

$$\Rightarrow |BE| = |BF| \cos \alpha + |FC| \sin \alpha$$

$$|EC| = |FC| \cos \alpha - |BF| \sin \alpha$$

因为交流低压电缆大多为 400mm² 以下电缆，其电抗值较小，且远小于电阻值，故电缆内阻抗等效于电阻值，如图 3 所示，又因 $|BE| > |BF|$ 所以 $|\Delta V| \approx |BE|$ ，等效于

$$|BC| = |BE|$$

$$\text{则 } |AC| = |AB| + |BE|$$

$$|BE| = |AC| - |AB|$$

$$|\Delta V| = |BE|$$

即整条三相电缆中单相导线的电压降等于：

$$\Delta V = IR \cos \alpha + IX \sin \alpha = I(R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

设电缆单根导线单位长度电抗 λ ，电阻率 ρ ，电缆线截面积 S ，长度 L ，则

$$X = \lambda L$$

注： λ 无精确值时取 0.08mΩ/M。

$$\Rightarrow \Delta V = I * \left(\rho \frac{L}{S} \cos \alpha + \lambda L \sin \alpha \right)$$

因单相回路与三相回路电压降算法不同，引入系数 k ，

$$\Rightarrow \Delta V = kI * \left(\rho \frac{L}{S} \cos \alpha + \lambda L \sin \alpha \right)$$

注： k 三相回路取 1，单相回路取 2。

即：电缆中单相导线的电压降等于单相导线电阻值与负荷功率因数的积加上单相导线电抗值与功率因数电角度的正弦值的和，再与负荷计算电流、系数 k 的乘积。

2.4 电缆三相线路电压降计算

三相电力系统中线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$V_{\text{线}} = \sqrt{3}V_{\text{相}}$$

$$\Delta V_{\text{线}} = \sqrt{3}\Delta V$$

$$\Rightarrow \Delta V_{\text{线}} = \sqrt{3}K \left(\rho \frac{L}{S} \cos \alpha + \lambda L \sin \alpha \right)$$

2.5 电压降百分比

电压降常用百分比表示，是电缆单相导线电压降 ΔV 与负荷端相电压标称值 V 的比乘以百分百，设其为 u ，则

$$u = \frac{\Delta V}{V} * 100\%$$

国家标准要求动力设备端电压电压降百分比不得大于 $\pm 5\%$ 。1kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆用于三相 380V 系统的电压损失如表 1 所示。

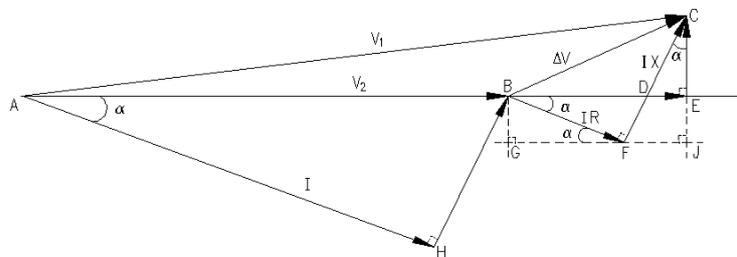


图 3

表 1 1kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆用于三相 380V 系统的电压损失

截面 (mm ²)	电阻 $\theta = 80^\circ\text{C}$ (Ω/km)	感抗 (Ω/km)	电压损失 [% / (A·km)]						
			cos φ						
			0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
铜	4	5.332	0.097	1.253	1.494	1.733	1.971	2.207	2.430
	6	3.554	0.092	0.846	1.006	1.164	1.321	1.476	1.620
	10	2.175	0.085	0.529	0.626	0.722	0.816	0.909	0.991
	16	1.359	0.082	0.342	0.402	0.460	0.518	0.574	0.619
	25	0.870	0.082	0.231	0.268	0.304	0.340	0.373	0.397
	35	0.622	0.080	0.173	0.199	0.224	0.249	0.271	0.284
	50	0.435	0.079	0.130	0.148	0.165	0.180	0.194	0.198
	70	0.310	0.078	0.101	0.113	0.124	0.134	0.143	0.141
	95	0.229	0.077	0.083	0.091	0.098	0.105	0.109	0.104
	120	0.181	0.077	0.072	0.078	0.083	0.087	0.090	0.083
	150	0.145	0.077	0.063	0.068	0.071	0.074	0.075	0.060
	185	0.118	0.078	0.058	0.061	0.063	0.064	0.064	0.054
	240	0.091	0.077	0.051	0.053	0.054	0.054	0.053	0.041

3 三相不平衡电力系统电缆电压降计算

3.1 概述

当三相系统不平衡时，线路电压会出现正序分量、负序分量或零序分量，常利用对称分量法进行电压计算。经过计算得出电压各分量值之后再将其各分量求和，得到各相电压值，之后再结合三相平衡系统电压降的计算方法计算出线路电压降即可^[3]。

设三相电压 V_A 、 V_B 、 V_C （见图 5a），对称分量法要求各电压正序分量 V_{A1} 、 V_{B1} 、 V_{C1} 大小相等，相位互差 120° 电角度，相位关系见图 5b 所示；各负序分量 V_{A2} 、 V_{B2} 、 V_{C2} 大小相等，相位互差 120° 电角度，相位关系见图 5c 所示；各零序分量 V_{A0} 、 V_{B0} 、 V_{C0} 大小相等，相位相同，见图 5d 所示。引入复数算子 a ：

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

乘以 a ，相当于向量逆时针旋转 120° ；乘以 a^2 相当于向量逆时针旋转 240° ；乘以 a^3 相当于向量逆时针旋转 360° ，知

$$a^3 = 1$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

（见图 4）

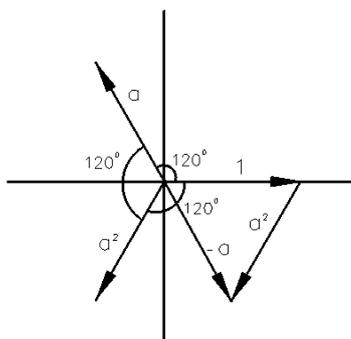


图 4 复数算子相位关系

3.2 正序分量电压计算

正序分量电压计算见图 6。

三相电压： U_A 、 U_B 、 U_C ，

$$\bar{V}_B = a^2 \bar{V}_A$$

$$\bar{V}_C = a \bar{V}_A$$

$$\bar{V}_A + a \bar{V}_B + a^2 \bar{V}_C = \bar{V}_A + a^3 \bar{V}_A + a^3 \bar{V}_A = 3 \bar{V}_A$$

$$\Rightarrow |\bar{V}_{A1}| = \frac{1}{3} \left(|\bar{V}_A| + a |\bar{V}_B| + a^2 |\bar{V}_C| \right)$$

得出结论：三相电压向量，将 U_B 逆时针旋转 120° ， U_C 逆时针旋转 240° 后求三相电压矢量和，其和矢量角即为正序分量 U_{A1} 矢量角，和矢量模值的三分之一即为 U_{A1} 的模。

$$\bar{V}_{B1} = a^2 \bar{V}_{A1}$$

$$\bar{V}_{C1} = a \bar{V}_{A1}$$

3.3 负序分量计算

负序分量计算见图 7。

三相电压： V_A 、 V_B 、 V_C ，

$$\bar{V}_{B1} = a \bar{V}_{A1}$$

$$\bar{V}_{C1} = a^2 \bar{V}_{A1}$$

$$\bar{V}_A + a^2 \bar{V}_B + a \bar{V}_C = \bar{V}_A + a^3 \bar{V}_A + a^3 \bar{V}_A = 3 \bar{V}_A$$

$$\Rightarrow |\bar{V}_{A2}| = \frac{1}{3} \left(|\bar{V}_A| + a^2 |\bar{V}_B| + a |\bar{V}_C| \right)$$

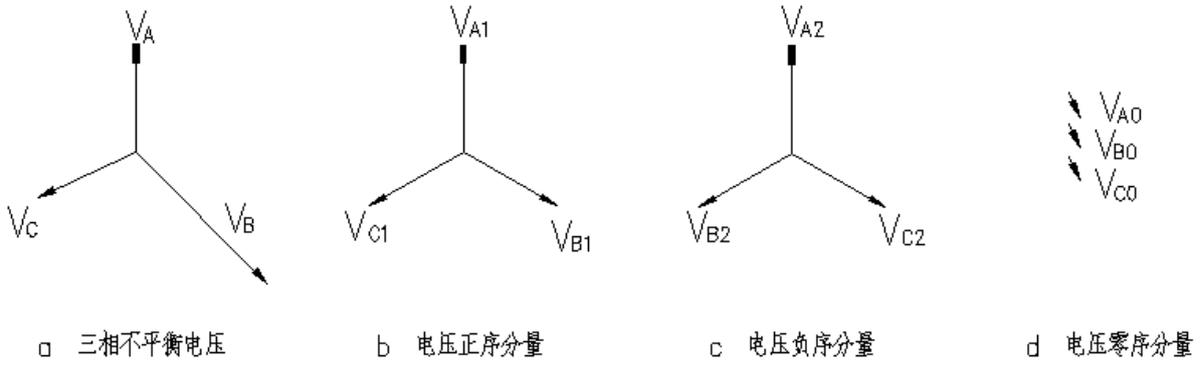


图5 对称分量法解析

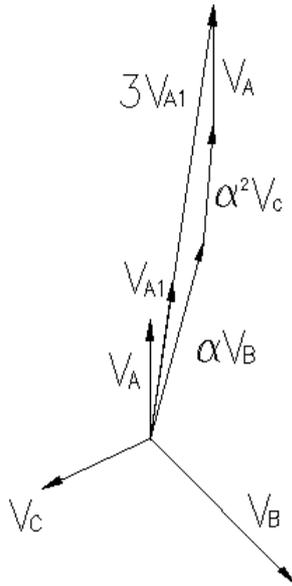


图6 正序分量解析

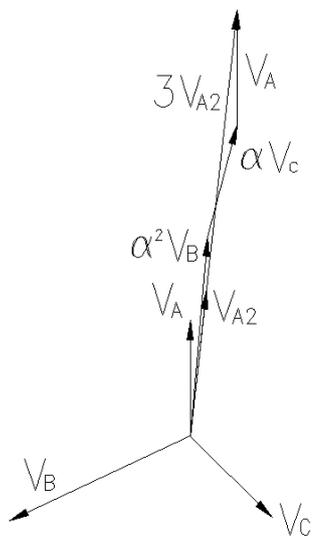


图7 负序分量解析

得出结论：三相电压向量，将 U_B 逆时针旋转 240° ， U_C 逆时针旋转 120° 后求二者与 U_A 三相电压矢量和，其和

矢量角即为负序分量 U_{A2} 矢量角，和矢量模值的三分之一即为 U_{A2} 的模。

$$\bar{V}_{B2} = a \bar{V}_{A2}$$

$$\bar{V}_{C2} = a^2 \bar{V}_{A2}$$

3.4 零序分量的计算

零序分量的计算见图8。

三相电压： V_A 、 V_B 、 V_C ，

$$\bar{V}_{A0} = \bar{V}_{B0} = \bar{V}_{C0}$$

$$\bar{V}_A + \bar{V}_B + \bar{V}_C = 3\bar{V}_{A0}$$

$$|\bar{V}_{A0}| = \frac{1}{3} (|\bar{V}_A| + |\bar{V}_B| + |\bar{V}_C|)$$

三相零序分量相位角相同，模值为三相电压矢量和模值的三分之一。

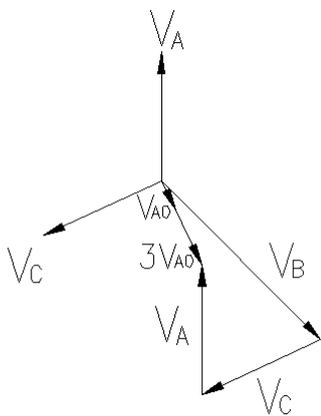


图8 零序分量解析

3.5 各相电压的计算

求得三相电压各分量之后，将同相电压的正序分量、负序分量、零序分量求和计算出此相电压值。以 V_A 为例说明，见图9。

$$\vec{V}_A = \vec{V}_{A1} + \vec{V}_{A2} + \vec{V}_{A0}$$

$$\vec{V}_B = \vec{V}_{B1} + \vec{V}_{B2} + \vec{V}_{B0}$$

$$\vec{V}_C = \vec{V}_{C1} + \vec{V}_{C2} + \vec{V}_{C0}$$

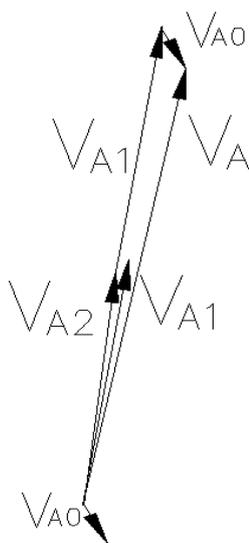


图9 V_A 矢量解析

3.6 三相不平衡电力系统电压分量计算过程存在的问题

在三相不平衡电力系统电压分量计算过程中，存在一个问题值得考虑。以 V_A 相为例，其正序分量 V_{A1} 和负序分量 V_{A2} 相位差是多少？这要根据电力系统不平衡程度经过具体分析来确定，在此不做累述。

4 影响电缆电压降的因素

电缆在使用过程中，因工况复杂，其自身电压降会受到多重因素的影响，我们必须对其中的不利因素加以甄别与处理，尽最大可能保持电缆良好的工作状态，从而延长电缆使用寿命，降低固定资产投资，维护企业利益^[4]。

4.1 材质的影响

电缆材质不同，电阻率不同，电缆直流电阻不同，当设备计算电流不变时，电缆电压降因电阻不同而有所差异。设电缆导线电阻率 ρ ，截面积 S ，长度 L ，则，

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

注：20℃时铜导线电阻率取值 $0.0172 \times 10^{-6} \Omega \cdot M$ ；

铝导线电阻率取值 $0.0282 \times 10^{-6} \Omega \cdot M$ 。

4.2 温度的影响

电缆导线的电阻率在不同温度下稍有不同，导致电缆电阻随之变化，电压降亦发生变化。设20℃时电缆导线电阻率 ρ_0 ， θ ℃时的电阻率 ρ_θ ，则计算方法如下：

$$\rho_\theta = \rho_0 * [1 + \alpha * (\theta - 20)]$$

注： α 电阻温度系数，取值0.004。

$$R_\theta = \rho_\theta \frac{L}{S}$$

4.3 电缆结构的影响

电缆结构不同，电阻的计算受到一定影响，计算结果不同。芯线为单股或多股时，电缆电阻的变化导致电缆电压降发生变化。引入绞入系数 C_J 。则：

$$R_\theta = \rho_\theta * C_J * \frac{L}{S}$$

注：电缆芯线单股时取值1，

多股时取值1.02。

4.4 敷设方式的影响

电缆穿管敷设或地埋敷设等情况下，因管径选择或土壤热阻系数不同，可能造成电缆散热效果降低，比如电缆温度升高，电缆电阻则会增大，电缆电压降增大；电缆多根敷设时，间距较小，或三相电缆分开敷设，三相电流磁场无法相互抵消，导致电缆间互感影响增加，涡流效应增大，电抗增大，电压升高；电缆多根并联使用，因线径选择不合适导致某一根电缆过载，影响电缆电压降。

4.5 电源的影响

当电源变压器输出电压偏高或偏低，将影响设备端电压的变化，影响设备运行电流的大小，从而影响电缆电压降的大小。

4.6 负荷的影响

电缆内阻抗不变，动力设备负荷变化导致设备运行电流变化，电缆电压降随之变化。

4.7 无功补偿的影响

设备无功补偿的目的是提高其功率因数。

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \alpha}$$

设备功率因数减小，负荷计算电流增大，电缆电压降增大。

4.8 系统三相不平衡或故障的影响

当动力设备三相不平衡或系统发生两相短路、单相接地等故障，产生负序电流或零序电流，导致电缆单相或两相电流变化，电缆电压降变化。

5 电缆电压降对动力设备的影响

电缆电压降与动力设备输出有功功率的关系如下：

$$P = 3(V_1 - \Delta V)I \cos \alpha$$

设备输出功率与设备端电压成正比。电源电压不变，当电缆自身内阻抗产生的电压降增大，设备端电压减小，设备输出功率降低，当设备负载不变时，设备输出功率的降低导致设备运行速度降低甚至堵转，设备运行电流增大，设备运行温度升高，甚至设备绝缘损坏。电流的增大，使电缆运行温度升高，影响电缆绝缘和使用年限，电缆电能损耗增加。电流的增大导致电缆电压降增加，进一步影响设备运行状况，从而形成恶性循环。电缆电压降的增大使设备端电压减小，电缆的电能输送能力及效率降低。

6 降低电缆电压降的改进措施

为了保证动力设备端电压保持在合理范围内，满足设备运行要求，需要优先选择电阻率低的新材料；合理选择电缆

截面积，减少电缆敷设长度，降低电缆自身阻抗；要使电缆远离热源，合理安排电缆负荷，保持电缆运行温度合适；科学分配三相负荷容量，保持负荷三相平衡；合理制定负荷的配电方式，如照明和动力负荷分别配送电、短时工作制负荷与长时工作制负荷分别配送电；采取科学的敷设方式，降低线间容抗、互感的影响并平衡好电缆散热与载流量的关系^[5]；做好设备巡检和维保工作，保持设备良好工况，降低设备故障率，减少设备短路、断路、接地故障出现的负序、零序电流；合理选择电源变压器容量及其输出电压，保持系统状态稳定；合理补偿设备无功功率，提高系统功率因数，降低负荷计算电流值；零线接线牢固，避免零点漂移现象。总之，我们要尽最大努力降低电缆电压降的不良影响，维持设备的正常运行。

7 结语

通过对交流低压电缆的内阻抗以及影响电缆电压降因素的分析，我们对三相平衡系统亦或三相不平衡系统交流低压电缆电压降的计算具有了清晰的认识。我们不再苦恼于对影响电力系统用户负荷端电压以及影响电源运行状态和电能输送能力等诸多情况原因分析时的茫然。我们更加懂得了如何采取必要的技术手段和措施减少电缆电阻产生的有功损耗以及电缆电抗产生的无功损耗，从而更好的降低电缆电压降。因此，我们必须对电缆采取适当、合理的敷设方式并加强对电缆线路的维护。

参考文献

- [1] GBT 2009.50—2008 电工术语、发电、输电及配电、通用术语[S].
- [2] GB1 2325—2008 电能质量 供电电压偏差[S].
- [3] GB 50052—2009 供配电系统设计规范[S].
- [4] GB 50217—2018 电力工程电缆设计标准[S].
- [5] GB 16895.6—2014 电气设备的选择和安装、布线系统[S].