

不平衡牵引负荷对电网容量占有的探讨

仇龙刚 张永岚 安娜 刘浩 崔中一 刘洋
(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 电气化铁道牵引负荷是典型的不平衡负荷, 其负荷状况成为电网公司和铁路部门多年关注的热点问题, 理论计算了在线几种典型的牵引变压器的输出容量, 探讨了其各自对电网的占有容量, 理论分析了三相不平衡负荷的功率因数定义及提高功率因数的方法, 结合变电所实测数据, 经对比分析, 提出了抑制电压不平衡度的方法, 最后从供电部门角度, 探讨了牵引变电所容量电费计费方式。

关键词: 牵引变压器; 输出容量; 占有容量; 容量利用率; 功率因数; 容量电费

Abstract: Electrified railway traction load is a typical unbalanced load, and its load status has become a hot issue concerned by the grid companies and the railway sector for many years. The output capacity of several typical traction transformers is calculated theoretically, and their capacity occupation in power grid is discussed. The definition of power factor of three-phase unbalanced load is analyzed theoretically and the method to improve the power factor is given. Then combined with the measured data in traction substation, the method of reducing voltage unbalanced degree is proposed by the comparison and analysis. Finally, the calculation methods of capacity tariff in traction substation are discussed as viewed from the power supply departments.

Key words: traction transformer; output capacity; capacity occupation; capacity utilization; power factor; basic capacity charge

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0029-05

作为大宗电力用户的电气化铁道牵引负荷, 由于其波动性、随机性、近远期负荷相差大、负载率低、供电可靠性要求高以及负序、谐波等一系列不良特征^[3], 被公认为是一种典型的不平衡负荷。牵引变压器联结方式的多样性使其对电网的影响具备特殊性, 文献[4]和[5]用实测数据充分考虑变压器的过载能力对牵引变压器的合理选择进行了分析; 文献[6]通过建模仿真分析了牵引变压器在电铁牵引供电系统中对公用系统所造成的影响; 文献[7]介绍了几种电价收费方式; 文献[8]针对客运专线仅提出了基本电费交纳方案。下面则针对其对电网容量占有问题进行探讨, 并理论分析了不平衡负荷功率因数的定义, 最后对供电部门关注的电铁电价收费方式问题给予几方面的建议。

1 不同接线牵引变压器容量分析

变压器的额定容量是指其一次侧从电网所吸取的视在功率, 是指输入容量; 输出容量是指变压器二

次侧输出的视在功率。对一般的变压器来说, 其输入容量和输出容量基本相等, 结构容量与额定容量相等, 但对于牵引变压器则要特殊对待。牵引变压器的容量利用率是指牵引变压器的最大输出容量与其额定容量之比。

1.1 单相接线牵引变压器

纯单相接线牵引变压器高压绕组接三相电源的某两相, 电压为 110 kV 或 220 kV, 低压绕组的首端接至牵引母线上, 末端与钢轨、地连接, 输出电压 27.5 kV, 接牵引母线的一端, 同时给左右两侧的供电臂供电, 其电路原理图如图 1 所示。

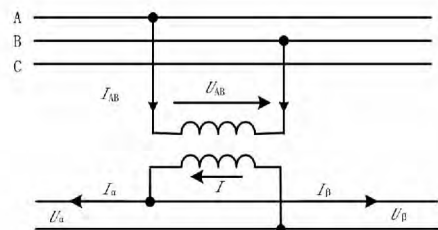


图 1 单相接线变压器

当工作绕组达到额定负荷 U_N, I_N 时, 单相接线

变压器的输出容量为

$$S_1 = U_N I_N \quad (1)$$

依据视在功率法 其对电网的占有容量为

$$S_s = S_a + S_b + S_c = U_N I_N = S_1 \quad (2)$$

则其容量利用率为

$$K = \frac{\text{额定输出容量}}{\text{额定容量}} \times 100\% = 100\% \quad (3)$$

在三相电力系统中产生的负序电流最大, 不对称度为 100%, 但由于主接线简单、设备少、占地面积小、投资省等优点, 在电力网比较发达的地区仍然得到利用^[1]。

1.2 单相 V/v 接线牵引变压器

V/v 接线牵引变压器原边接入电力系统的两个线电压(如 AB、BC), 次边各有一端分别接到牵引侧的两相母线上, 公共端子与轨道及接地网连接。由于对地电压相位不同, 中间必须用分相绝缘器断开。其电路原理图如图 2 所示。

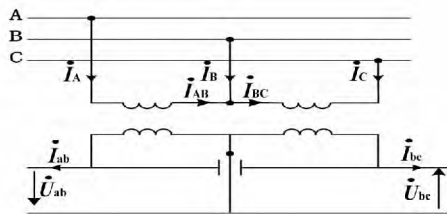


图 2 单相 V/v 接线变压器

当 I_{ab} 、 I_{bc} 达到额定值 I_e 时, 即 $I_{ab} = I_{bc} = I_e$, 则额定输出容量: $S_1 = I_{ab} U_e + I_{bc} U_e = 2U_e I_e$ (4)

对电网的占有容量为: $S_s = 2U_e I_e$, 所以 $K = 100\%$, 因次边绕组电流等于供电臂电流, 因而变压器的容量能得到充分利用。在两臂负荷相同情况下, 不对称度为 50%。和纯单相接线比, 对系统的负序影响减少, 设备相对较少但需跨相供电。

1.3 Scott 接线牵引变压器

Scott 接线牵引变压器由两台单相变压器构成。变压器的原边绕组联成倒 T 形接入三相电力系统, 副边绕组联成相位差为 90° 的 V 形, 公共端接地和钢轨, 两个开口端分别接入接触网相邻的两区段, 相邻两接触网对地电压相位不同, 故必须用分相绝缘器断开。其电路原理图如图 3 所示。

原边电流: $I_A + I_B + I_C = 0$, 若副边两相牵引负荷电流相等时, 且 M、T 两供电臂功率因数相等时, 以 \dot{I}_β 为参考相量列磁势平衡方程为

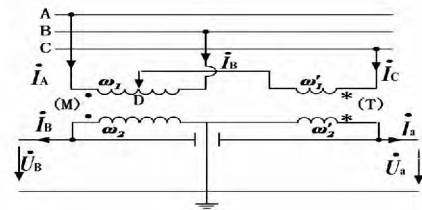


图 3 Scott 连接变压器

$$\begin{cases} \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \\ \omega'_1 \dot{I}_C = \omega'_2 \dot{I}_a \\ \frac{\omega_1}{2} \dot{I}_A - \frac{\omega_1}{2} \dot{I}_B = \omega_2 \dot{I}_\beta \end{cases} \quad (5)$$

解方程得:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_T} \begin{pmatrix} -1 & \sqrt{3} \\ -1 & \sqrt{3} \\ 2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

达到额定输出时 $I_\alpha = I_\beta = I_e$ 此时,

$$I_A = I_B = I_C = \frac{2}{\sqrt{3}K_M} I_e \quad (7)$$

其中 $K_M = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ $K_T = \frac{\omega'_1}{\omega'_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} K_M$ 。

则变压器额定输出容量为

$$S_1 = UI_\alpha + UI_\beta = 2UI_e \quad (8)$$

对电网的占有容量计算如下。

$$\begin{aligned} S_s &= U_{CD} I_C + U_{AD} I_A + U_{BD} I_B \\ &= U_{CD} I_C + \frac{1}{2} U_{AB} I_A + \frac{1}{2} U_{AB} I_B \\ &= (U_{CD} + U_{AB}) \frac{2I_e}{\sqrt{3}K_M} = \frac{2I_e}{\sqrt{3}K_M} U_{AB} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right) \\ &= \frac{2I_e}{\sqrt{3}K_M} U_{\alpha K_M} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right) = \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \right) UI_e \end{aligned} \quad (9)$$

则其容量利用率为

$$K = \frac{S_1}{S_s} \times 100\% = 92.8\% \quad (10)$$

所以, 当 M 座和 T 座两供电臂负荷电流大小相等, 功率因素也相等时, 变压器容量可全部利用, 对接触网也可实现两边供电, 但其造价高, 主接线复杂, 对绝缘水平要求高。

1.4 YNd11 接线牵引变压器

高压侧绕组为 YN, 三个端子(A)、(B)、(C)接电力系统的 A、B、C 三相(或 ACB、BCA...), 中性点通过隔离开关 QS 接地。中性点何时接地由电力调度决定, 通常是断开的。次边绕组接成 Δ (c) 端子接钢轨和地。(a)、(b) 端子分别接牵引母线^[2]。其

电路原理图如图 4 所示。

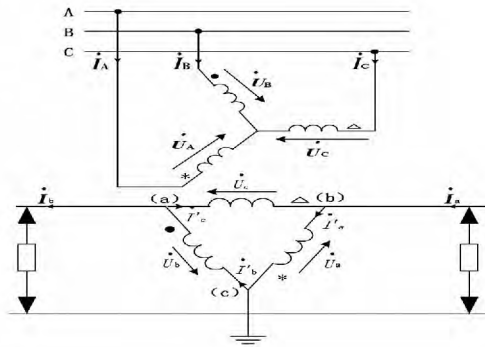


图 4 YNd11 接线变压器

设额定输出电压为 U_e ，两供电臂额定电流为

$$I_a = I_b = I_c, \begin{pmatrix} i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3/2 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 \\ -1/3 & -1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (11)$$

在两臂负荷相等的情况下，以 i'_a 为基准相量， $i'_a = I \angle 0^\circ$ ， $i'_b = I \angle -120^\circ$ 。两接地相绕组（臂绕组）的电流大小相等为

$$I'_a = I'_b = \frac{2.65}{3} I \quad (12)$$

非接地相绕组（自由相绕组）的电流较小为

$$I'_c = \frac{1}{3} I = \frac{1}{2.65} I'_a \quad (13)$$

因 $I_{ep} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{el}$ 则

$$\begin{aligned} I_a = I_b = I_c &= \frac{3}{2.65} I_{ep} \\ &= \frac{3}{2.65} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} I_{el} = 0.655 I_{el} \end{aligned} \quad (14)$$

三相变压器的额定容量，即占有的电网容量为

$S_S = \sqrt{3} U_e I_{el}$ ，额定输出容量为

$$\begin{aligned} S_1 &= U_e I_a + U_e I_b = 2 U_e I_e \\ &= 2 U_e \times 0.655 I_{el} = 1.134 U_e I_{el} \end{aligned} \quad (15)$$

$$K = \frac{S_1}{S_S} \times 100\% = \frac{1.134 U_e I_{el}}{\sqrt{3} U_e I_{el}} \times 100\% = 75.6\%$$

(16)

因该变压器原边采用 YN 接线，中性点引出接地方式与高压电网相适应，且其制造相对简单，价格相对便宜，运用技术成熟，但其容量不能充分利用，输出容量只能达到其额定容量的 75.6%，引入温度系数后，也只能达到 84%。和单相接线牵引变电所相比，主接线比较复杂，设备多，占地面积大，工程投

资大。

以上分析的各牵引变压器的容量利用率是理想状态下的理论计算值，实际的牵引变压器利用率非常低，据统计全线牵引变压器的容量利用率低至 15%~20%^[3]，因为选择变压器容量既要满足正常运输，又要满足两小时紧密运行的需要，同时还要考虑远期运量的增长，再加上牵引负荷的一系列不良特征，很难保证使其工作在额定负载。另一方面，中国整流型电力机车的功率因数一般为 0.8~0.85，由于牵引网阻抗及牵引变压器阻抗的影响，功率因数平均值在 0.75 左右，再生工况下会低至 0.2~0.4。

2 不平衡三相负荷的功率因数

2.1 不平衡三相负荷功率因数的定义

其实无论负荷是几相的，也无论其是否对称，定义公式即：功率因数 = (三相有功功率之和) / (三相视在功率之和) 是不变的，而视在功率的计算方法有两种，一种是算术视在功率，另一种是向量视在功率，对于三相不平衡负荷有

$$P_{\text{总}} = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c \quad (17)$$

$$S_{\text{总}} = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2} \quad (18)$$

采用算术视在功率计算方法，其功率因数可定义为

$$\cos \varphi = \frac{P_a + P_b + P_c}{S_a + S_b + S_c} \quad (19)$$

采用向量视在功率计算方法，其功率因数可定义为

$$\cos \varphi = \frac{P_a + P_b + P_c}{\sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2}} \quad (20)$$

2.2 提高功率因数的方法

功率因数低不仅会导致牵引变压器的容量不能充分利用，而且在视在功率不变的情况下致使输送的有功功率降低，或者系统容量得不到充分利用，接触网上的能量损耗和电压损耗也会增大。从根本上有以下两种提高功率因数的方法。

(1) 提高用电自然功率因数。可提高电力机车的功率因数，改善牵引网的阻抗特性（包括减小牵引网单位阻抗值和阻抗角、限制供电臂的长度等），合理选择牵引变压器容量，提高其容量利用率。

(2) 在牵引变电所牵引侧装设并联电容补偿装置。它同时还可以减小电压损失，改善电压质量，提高牵引侧母线电压，降低系统供电电流及电能损失；

并补装置还可吸收谐波电流,具有滤波作用。电气工程的分组分级可调并联电容补偿技术^[9]对于提高功率因数就直接有效。

3 牵引变压器三相电压不平衡度实例分析

牵引负荷产生的负序电流流过电网阻抗将产生负序电压,引起三相电压不平衡,国标给出了电压不平衡度的近似计算值,并规定电力系统公共连接点处的电压不平衡度 ε_U 的 95% 概率不得超过 2%,短时值不得超过 4%。

$$\varepsilon_U = \frac{\sqrt{3}U_N I^{(-)}}{10S_d} \% \quad (21)$$

式中 U_N 为线电压; S_d 为短路容量。

当牵引变压器负荷与变压器接线方式一定时,变电所高压三相侧电压不平衡度与进线短路容量成反比,与负序功率成正比。

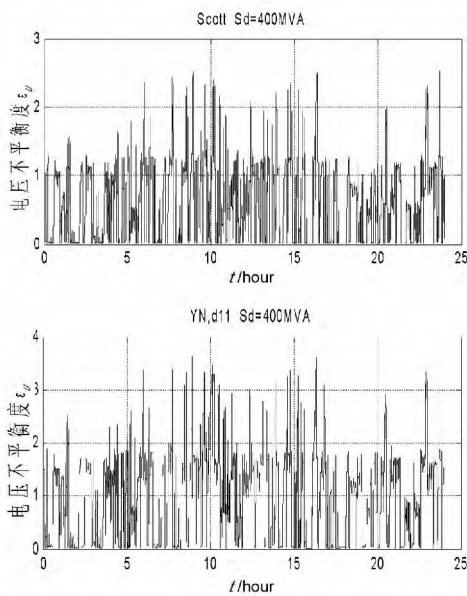


图 5 两类牵引变压器三相电压不平衡度趋势图

以某牵引变电所为例,变压器为 YNd11 接线,测得该变电所两臂负荷的基波电流全天 24 h 的数据(3 s 为一个采样间隔,共 28 800 个点),使用 Matlab 软件的计算功能,可得使用 YNd11 和 Scott 接线变压器相应的三相电压不平衡度曲线如图 5 所示。此时系统进线为 110 kV,短路容量约为 400 MVA,显然使用平衡变压器和常规变压器相比有较好的抑制负序能力,三相电压不平衡度基本达到国标要求。

选用更高电压等级的电力系统时,根据实测数据

计算,图 6 给出 YNd11 常规变压器在 220 kV 进线时(短路容量假定为 750 MVA)三相电压不平衡度的曲线图,不难看出,电压不平衡度得到明显改善。

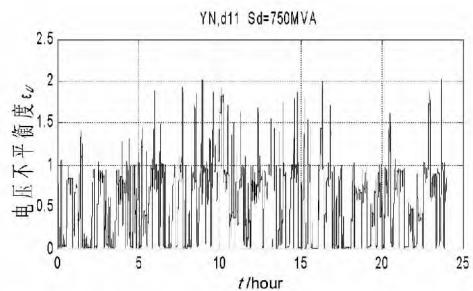


图 6 YNd11 接线变压器三相电压不平衡度趋势图(220 kV)

4 牵引变电所容量电费计费方式

众所周知,中国供电部门对大工业企业(用电变压器容量 315 kVA 及以上)用电实行两部制电价制度,自 1994 年开始中国电气化铁路就开始执行两部制电价。基本电价是按照工业企业的变压器容量或最大需用量(即一月中每 15 min 或 30 min 平均负荷的最大值)作为计算电价的依据,由供电部门与用电部门签订合同,确定限额,每月固定收取,不以实际耗电数量为转移;电度电价,是按用电部门实际耗电度数计算的电价^[10]。由于电气化铁路自身特殊的供电结构造成电力系统侧三相电压严重不平衡,同时,也给系统注入了谐波负序等问题,严重影响了电网正常运行,对电网中其他用户的供电电能质量产生了不良的影响。因此单纯地按照变压器的额定容量计算是不合理的。

(1) 采用容量缴纳基本电费对供电部门来说,比较容易操作。若按固定容量收取基本电费,经前面的容量分析可知,铁路部门一般会考虑使用容量利用率最高的单相或 V/v 变压器,但负序电流大,不平衡度高。所以电网公司应制定允许电铁投运的技术标准,要求变压器一次侧三相电压、电流不平衡度必须达到标准,否则予以经济处罚。

(2) 牵引变压器容量利用率可以作为衡量收费等级的一个标准,即可以根据变电所的日负荷曲线划分,申请不同的用电负荷下采取不同的电价,当天变电所变压器利用率达到标准的,可以免收惩罚性费用,否则额外收取一部分惩罚性费用。

(3) 铁路部门选择合适的基本电费交纳方式重点在于找到安装容量和最大需量法的平衡点,而确定该

平衡点的重点在于牵引变压器的安装容量^[4]。如果按照最大需量收取基本电费,铁路部门会把最大需量报低以节约基本电费。所以电网公司要将实际负荷中超出最大需量部分予以高倍罚款来遏止这一现象。

(4) 无功计量可采用反送正计,谐波功率也纳入计费范围。因此其基本电价应该在按照牵引变压器容量或者最大负荷需量的基础上再加上一定的罚款,以此来督促铁路部门对电铁的谐波、无功进行治理。

(5) 电力部门必须在电铁投运前作出充分的实地调研,包括电能质量、继电保护及自动装置、电能计量准确性、系统无功补偿等,将电铁产生的危害降到最小,并对已投运电铁进行实测,对不满足要求的,尽快提出整改意见。

(6) 供电部门可以根据铁路部门月用电量或年用电量寻求电价计费方式^[2]新方案,制订合理的方案供铁路部门选择,这样在督促用电客户提高用电设备或最大负荷的利用率的基础上,对牵引变压器电网容量占有进行合理的收费。

5 结 论

综上所述,综合评价技术经济性,单相接线最好,其次是 V/v 和平衡接线,YNdll 接线最差。由第 3 节实测数据分析可知,在两条供电臂负荷的随机分布下,不同接线牵引变压器的负序电流恒有以下结果:平衡接线最小,三相接线次之,单相接线最大。铁路部门只有根据实际情况合理选择变电所接入的系统电压等级和选用合适的牵引变压器才能够起到改善变电所系统三相电压不平衡的作用,采取措施提高容量利用率及系统功率因数,减小负序电流及

高次谐波的干扰,在保证正常供电和达到电能质量标准的基础上,尽量减少变压器容量才是降低容量电费问题的根本方法,供电公司要根据实际牵引变电所接线方式和负荷状况制定合理的技术标准,并采取惩罚措施来规范和督促铁路部门对不平衡牵引负荷的治理。

参考文献

[1] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统(第三版) [M]. 成都:西南交通大学出版社,2009.

[2] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都:西南交通大学出版社,2010.

[3] 贺建闽,李群湛. 面向电力市场的电气化铁道 [J]. 电气化铁道,1997(4):1-3.

[4] 贺建闽,黄治清. 牵引变压器容量的合理选择 [J]. 电气化铁道,2005(6):1-5.

[5] 曹建设,臬秀芳. 牵引变压器的过负荷能力及容量的合理选择 [J]. 电气化铁道,2008(1):10-13.

[6] 王金浩,薛磊,李蒙赞,等. 不同牵引变压器接线方式的应用研究 [J]. 现代电力,2009,26(1):33-39.

[7] 兰青,李群湛,米天翔,等. 电气化铁道电价收费方式的探讨 [J]. 铁道运输与经济,2007(2):35-37.

[8] 吕文利. 高速客运专线基本电费缴纳方式的探讨 [J]. 铁道建筑技术,2011(5):50-52.

[9] 贺建闽,李群湛. 牵引变电所功率因数及其补偿措施研究 [J]. 铁道学报,1997(6):116-120.

[10] 陈清瑞. 两部制电价制度与改进策略 [J]. 粤港澳市场价格与管理,2008(9):7-8.

作者简介:

仇龙刚(1988),硕士研究生,研究方向为牵引电力系统、电能质量、直流牵引供电系统等。

(收稿日期:2014-03-20)

(上接第 9 页)

参考文献

[1] 徐岩,林旭涛,赵亮,等. 大型风电场对工频故障分量距离保护影响的研究 [J]. 电力系统保护与控制,2013(10):118-125.

[2] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析 [J]. 电力自动化设备,2013(6):1-6.

[3] 余昆,曹一家,陈星莺,等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算 [J]. 中国电机工程学报,2011(10):118-125.

[4] 陈培育,郭小燕. 风电场风速平稳性及其平稳化处理

研究 [J]. 河南科技,2013(16):153-154.

[5] Urmila M. Diwekar. A Novel Sampling Approach to Combinatorial Optimization Under Uncertainty [J]. Computational Optimization and Applications,2012(20):102-103.

作者简介:

王银萍(1987),硕士研究生,研究方向为风机控制与电力系统继电保护;

王维庆(1959),教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化和风力发电机的智能控制;

张新燕(1964),博士,教授,硕士生导师,研究方向为电力系统控制;

王海云(1973),副教授,硕士研究生导师。主要研究方向为可再生能源发电与并网技术。

(收稿日期:2014-03-10)