

牵引变电所的外特性及其在继电保护中的应用

陈 薇

(华东交通大学电气工程系, 江西 南昌 330013)

摘要: 根据电路原理和电机学的基本理论, 结合电气化铁路的实际状态, 构成三相牵引变电所和牵引供电系统的等值电路, 得出外特性曲线。同时, 阐明等值计算电路和外特性曲线在电气化铁路设计和运行以及继电保护整定工作中的重要实用价值。

关键词: 电气化铁路; 牵引变电所; 等值电路; 外特性; 继电保护

中图分类号: TM922.4; TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)02-0028-05

1 前言

电气化铁路的设计工作中, 牵引供电系统的电气计算方法通常依赖于设计条件。这时, 由于缺乏变电所母线电压的准确数据, 只能取近似值, 甚至所取的电压数值与牵引负荷无关。即使进行必要的电气计算, 事先亦必须向电力系统索取资料, 如系统阻抗等。但是, 电力系统处于发展和变化之中。初步设计时获取的系统技术数据, 到电气化区段开通时便可能发生了变动。运行实践已经证明, 当前铁路部门采用的系统阻抗值之准确性存在问题。此外, 向电力系统索取资料时, 还要履行手续、发送公文和提供经费等。

电气化铁路实际开通和牵引供电系统投入运行后, 对其物理实质和数学表征, 时常缺乏了解。近期运量下, 如何洞察和掌握供电系统的现有状态和通过能力? 远期运量下, 如何发掘现有供电系统的潜力, 并预测该系统到那时的工作状态? 如果现有系统的极限通过能力(与牵引供电设备的技术规格、线路状况、继电保护、铁路信号系统等多种因素有关)不能满足运量增长的需要, 又应如何加强乃至改造该系统, 亦即如何进行扩大电气化铁路运输能力的技术改造?

实质上, 以上这些问题的解决, 都离不开牵引供电系统的等值计算电路。对于实际运行的铁路电气化区段, 铁路部门如果能够正确拟定供电系统的等值电路及其有关参数, 就可以不再依赖电力系统的有关部门, 还可以不再受原来设计文件和资料的约

束, 而只将其作为运行的参考, 并以资比较和对照。任何设计工作必然带有一定程度的假拟性和误差, 这是设计规范所容许的。运行实践才是供电装置的真实工作状态。

了解变电所母线电压与牵引负荷的关系, 即其外特性(伏安特性), 就可以计算牵引网电压和电力机车的受电弓电压以及系统阻抗。众所周知, 牵引变电所电压随牵引负荷及供电系统的工作状态而变化, 不仅在变电所的变压器中, 而且在电力系统的阻抗中, 均产生牵引负荷引起的电压损失。为了求得系统内的牵引变电所母线电压, 还必须考虑相邻供电臂的负荷影响。供电系统电压和电流不对称程度的降低借助于牵引变电所对高压输电线的换相联接方式。^[1] 不对称的牵引负荷在高压侧不产生零序对称分量, 即零序电压和零序电流均等于零。因此, 供电系统采用三相变压器时, 尽管有三相铁心, 但对每相而言, 均可作独立分析, 即不依赖于其他相, 只作为单相变压器进行研究, 而不必采用对称分量法。原边和次边的每相绕组电流在数值上的差别只取决于变比的改变。上述问题均与牵引供电系统的等值计算电路有关。

如所周知, 在牵引变电所的继电保护整定计算中, 电力系统阻抗是重要的技术参数之一。以本文提供的牵引变电所外特性作为有力工具, 便能方便而准确地获取电力系统现有的实际阻抗值。显然, 以此为依据时, 可以有效地确保牵引供电系统继电保护整定计算的精度, 从而有利于消除电气化铁路继电保护装置的非正常运行以至动作失灵。

2 牵引供电系统的等值电路

电气化铁路供电网络的计算可按以下两个阶段进行: 考虑电力系统和牵引变电所变压器的阻抗时,

收稿日期: 1999-08-10

作者简介: 陈薇(1942-), 女, 副教授, 现从事电力系统及牵引网继电保护的教学及研究工作。

直至变电所牵引母线的供电网络计算,以及 25kV 牵引网本身的计算。在计算网络中,牵引变电所母线的空载电压应该如何取值是一个关键问题。考虑与牵引网电压状态之确定有关的全部基本因素时,等值计算电路对应于三相变压器的 25kV 牵引供电系统。电气计算以三相系统的相别标志为基准,而不是三相变压器的端子标志(牵引侧有时例外)。本文采用如下计算条件:

(1) 在三相系统的综合性分析中,取电力系统 A 相工作电压(即变压器高压侧 A 相绕组电压) \dot{U}_A 为基准(参考)相量,即其与实轴重合,亦即 $\dot{U}_A = U_A$;

(2) 在变压器的相量分析中,采用合理定向法^[2];

(3) 变压器的空载电流等于零,则原边和次边的磁势平衡;

(4) 变压器各相绕组的漏阻抗相等;

(5) 各牵引变电所主变压器的分接开关处于同一位置,而且是中间位置,即变比为 110/27.5 或 220/27.5 等。

不计变压器的短路阻抗时,变压器原边和次边绕组的工作电压同相。原边绕组工作电压即原边输入电压,次边绕组工作电压即次边输出电压,它们在性质上都属于负载电压。计及短路阻抗时,这两组电压不仅数值不等,而且相位也不相同。为简便起见,除上述计算条件外,粗略地取这两组电压之间的相位差等于零,从而成为附加计算条件。

采用对应换相联接方式即 ABC 换相联接方式时,牵引供电系统(只包含一个变电所)的接线图如图 1(a)所示。高压侧的实有进线电压为 \dot{U}_A, \dot{U}_B 及 \dot{U}_C ,牵引侧的输出电压为 $\dot{U}_{ac}, \dot{U}_{ba}$ 及 \dot{U}_{cb} 。高压绕组电流为 \dot{I}_A, \dot{I}_B 及 \dot{I}_C ,低压绕组电流为 $\dot{I}_{ca}, \dot{I}_{ab}$ 及 \dot{I}_{bc} 。馈线电压为 \dot{U}_{ac} 和 $\dot{U}_{bc} = -\dot{U}_{cb}$ 。馈线电流为 \dot{i}_a 和 \dot{i}_b ,相应的功率因数角为 α 和 β 。钢轨和大地回流为 $\dot{I}_a + \dot{I}_b = -\dot{I}_c$ 。这是一个无源多端口网络,如图 1(b)所示。

直接引入多端口的输入电压时,可得简化的等值电路。但是,该进线电压随牵引负荷以及牵引变电所至发电厂的电距离而波动。近似计算中,可取其等于牵引变电所的空载电压,亦即电力系统在牵引变电所入口处的原有电压水平。然而,该空载电压 U_0 又随电力负荷及其电距离与潮流分布而波动。因此,牵引变电所的实际进线电压和空载电压均为变量,上述直接引入进线电压的作法是一种近

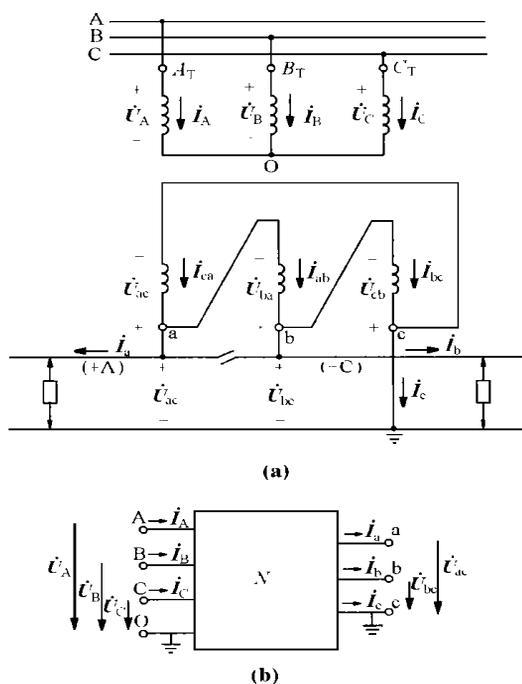


图 1 牵引供电系统接线图

似处理方法。在等值电路中,只有直接引入同步发电机的恒定电势,才是精确的作法。这时,要对电力系统进行大规模数学和物理模拟。但是,由于网络中各支路的阻抗和电流相互关联,所以构成精确的等值电路并非易事。

在这里,对变压器 A 相绕组言,共有四个电压:原边输入电压 \dot{U}_A ,次边输出电压 \dot{U}_{ac} ,原边空载电压 \dot{U}_{A0} ,次边空载电压 \dot{U}_{ac0} 。根据上述附加计算条件,假设四者同相。对于变压器空载电压 \dot{U}_{A0} 和 \dot{U}_{ac0} 的变动,采用实测方法予以考虑,才是切实可行的好办法。在这种状态下,电路的每相阻抗 Z 的物理含义已经由变压器阻抗扩充到包括电力系统和牵引变电所主变压器的阻抗。这时,阻抗 Z 称为牵引变电所的外特性阻抗(电源内阻抗),须归算到牵引侧,即主变压器次边的三角形中。假设电力系统容量无限大,即电力系统是牵引变电所的理想电压源时,则变电所空载电压的确为常量,外特性阻抗只为变压器短路阻抗。由此可见,只有在这时,上述近似处理方法才能真正成立。

同时采用上述附加计算条件和近似处理方法,即取 $\dot{U}_A = \dot{U}_{A0} = \text{const.}$ 后,便意味着可以将牵引供电系统脱离电力系统,从而能够对前者进行独立分析。这种作法同研究中压和低压配电网的运行状态时所采用的方法相类似^[4]。

同时考虑电压水平和电流分布时,得牵引供电系统相量图,如图2所示。因为馈线电流 i_a 和 i_b 的相位角分别为 α 和 β ,故 $\dot{I}_a = I_a \angle -\alpha$, $\dot{I}_b = I_b \angle (-60^\circ - \beta)$ 。由电流 \dot{I}_a 和 \dot{I}_b 合成,得变压器低压绕组电流 \dot{I}_{ca} , \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} 以及高压绕组电流 \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C 。变压器高压绕组电流的相位角分别为 A , B 和 C ,且 $A > \alpha$, $C < \beta$ 。当 $\alpha = \beta$ 时,两个工作相 A 和 C 的相位角也不相等,且引前相的相位角小于滞后相的相位角,即 $C < A$ 。由此可见,引前相绕组的电压损失必小于滞后相绕组的电压损失。

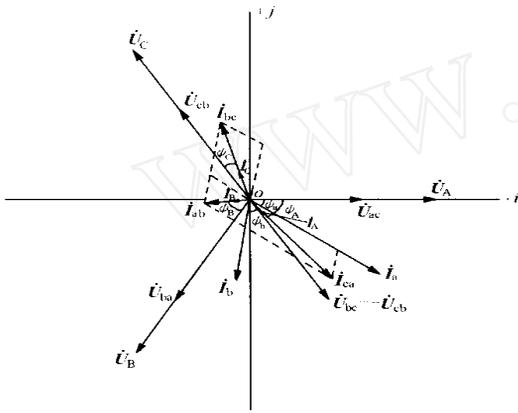


图2 牵引供电系统的电压和电流相量图

以上述分析为基础,由博返约,对于变压器牵引侧单相绕组及其供电臂,作如下单相分析^[3,4]。

2.1 +A相,滞后相

滞后相电路如图3(a)所示。电压方程式

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ac0} &= \dot{U}_{ac} + \dot{I}_{ca} Z \\ \dot{U}_{ac} &= \dot{U}_{ac0} - \dot{I}_{ca} Z = \dot{U}_{ac0} - Z(2/3 \dot{I}_a + 1/3 \dot{I}_b) \end{aligned}$$

考虑到图2的相位关系,得

$$U_{ac} = U_0 - Z[2/3 I_a \angle -\alpha + 1/3 I_b \angle (-60^\circ - \beta)] \quad (1)$$

式中 $U_0 = U_{ac0}$ ——变压器牵引侧空载电压,如取为29kV。

2.2 -C相,引前相

引前相电路如图3(b)所示。电压方程式

$$\begin{aligned} \dot{U}_{bc0} &= \dot{U}_{bc} + \dot{I}_{cb} Z \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_{bc0} - \dot{I}_{cb} Z = \dot{U}_{bc0} - Z(2/3 \dot{I}_b + 1/3 \dot{I}_a) \end{aligned}$$

为分析简便计,进行坐标变换,取变压器牵引侧空载电压 \dot{U}_{bc0} 为参考相量,得

$$U_{bc} = U_0 - Z[2/3 I_b \angle (-60^\circ - \beta) + 1/3 I_a \angle -\alpha] \quad (2)$$

式中 $U_0 = U_{bc0}$ 。

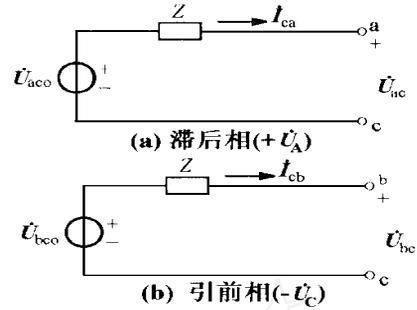


图3 原始电路

由数学模型式(1)和(2),生成牵引变电所供电臂的单相等值电路,如图4所示。等值电路按每个工作相单独作出,它的给定参数是变压器的空载电压 U_0 、内阻抗 Z 以及相邻(陪衬)供电臂的牵引负荷电流,从而构成三要素。空载电压表示为电压源,而邻臂电流表示为电流源。空载电压和内阻抗,可在牵引网的不同负荷下,由牵引变电所电压和电流的测量数据与外特性,予以确定之。邻臂电流的数据亦不难测得。

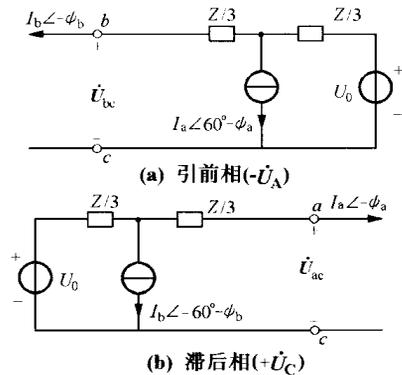


图4 等值电路

上述分析对象是ABC换相联接方式。实际中,共有六种换相联接方式^[1]。具体分析表明,在其他五种换相联接方式下,变压器输出电压的变化规律和等值电路的构成机理相同,均以引前相与滞后相马首是瞻。因此,由式(1)和(2),得变压器输出电压的普适外特性公式为

$$\left. \begin{aligned} U_q &= U_0 - Z[2/3 I_q \angle -\alpha_q + 1/3 I_h \angle (60^\circ - \beta_h)] \\ U_h &= U_0 - Z[2/3 I_h \angle (-60^\circ - \beta_h) + 1/3 I_q \angle -\alpha_q] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以上等值电路可用于牵引网单边供电或两边供电方式。等值电路构成后,已知列车运行间隔和牵引网阻抗,又已知电力机车的牵引能耗时,便可确定最远端电力机车的弓上电压。显然,这里的分析和计算方法比以往精确与完善。

该单相等值电路可以考虑到所有的加强与补偿装置,如辅助和保护导线、复线的横向联接点、串联或并联电容补偿装置、高压电缆、不同种类的增压变压器以及牵引网的分支区段等。另外,还可计及地区动力负荷的影响。在这里,能够模拟任何状况,而复线上、下行的列车数可以是随意的。只有采用等值计算电路时,对上述所有这些情况才能进行圆满的计算。

综上所述,采用单相等值电路时,可将牵引变电所作为独立电源。这样,牵引供电系统从广义缩小到狭义,从而给电气计算提供一条简捷的途径。牵引供电系统的电气计算方法,在铁路电气化的设计和运行条件下,应予以区分。设计时,间接地确定必要的原始数据。在运行条件下,实际数据直接由牵引变电所电压和电流的测量结果而取得。这就可能比较准确地进行计算工作,从而确定铁路电气化区段在正常和事故状态下的通过能力,并校核保护整定值。

3 牵引变电所外特性的平面曲线

3.1 外特性理论

牵引变电所的出口电压,即牵引母线电压与馈线电流的关系,称为变电所的外特性(伏安特性、负载线)。牵引母线电压为主变压器次边空载电压 U_0 (可视为常量)与变电所(包括电力系统)电压损失 U_b 的算术差。 U_b 为引前相馈线电流 I_q 与滞后相馈线电流 I_h 的二元函数。因此,外特性 U 也是电流 I_q 和 I_h 的二元函数,从而构成三维空间曲面,即

$$U = U_0 - f(I_q, I_h) = g(I_q, I_h)$$

若将电流 I_q 和 I_h 转化为一个等值电流 I_{eq} ,则外特性

$$U = h(I_{eq})$$

为等值电流 I_{eq} 的一元函数,从而构成二维平面曲线。

用电压损失代替电压降,而且在内阻抗 $Z = R + jX$ 中,不计电阻 R ,亦即电压损失只计电抗分量。假设电压、电流均为正弦波形。这样,经再次近似处理,由式(3),得引前相牵引母线电压

$$\begin{aligned} U_q &= U_0 - X [2/3 I_q \sin \varphi_q + 1/3 I_h \cos(150^\circ - \varphi_h)] \\ &= U_0 - I_{eq} X \end{aligned} \quad (4)$$

式中 I_{eq} ——引前相中,牵引负荷的等值电流,其值为:

$$I_{eq} = 2/3 I_q \sin \varphi_q + 1/3 I_h \cos(150^\circ - \varphi_h)$$

同理,由式(3),得滞后相牵引母线电压

$$\begin{aligned} U_h &= U_0 - X [2/3 I_h \sin \varphi_h + 1/3 I_q \cos(30^\circ - \varphi_q)] \\ &= U_0 - I_{eq} X \end{aligned} \quad (5)$$

式中 I_{eq} ——滞后相中,牵引负荷的等值电流,其值为:

$$I_{eq} = 2/3 I_h \sin \varphi_h + 1/3 I_q \cos(30^\circ - \varphi_q)$$

牵引变电所(包括电力系统)内阻抗 Z (不计电阻时,为内电抗 X) 与牵引变电所至发电厂距离、联接功率、牵引变电所主变压器容量及运行方式等有关。内阻抗(三角形中)等于变电所牵引母线处三相短路阻抗(星形中)的三倍。

综上所述,牵引变电所的外特性曲线是一条直线,由其斜率便能简捷地确定内阻抗,这就是本文的一个核心内容。在理论上,为求作外特性曲线,在两种不同状态下,按说进行两次绝对正确的测量就足够了。但是,考虑到不可避免的误差以及影响牵引网电压水平的多种因素,在相当长时间内,需要进行大量的测量工作。

一昼夜内,电力系统的负荷曲线发生波动。因此,在全日内的不同时刻,测量工作应进行多次。此外,还要考虑最严重的条件。某些铁路和电力系统具有十分明显的季节性运行特点。为此,在一年的不同时期,尽可能获得各种不同的参数(如空载电压和内电抗),亦即求得多条外特性曲线,从而正确地求得电力系统的最大和最小阻抗。

3.2 外特性的实际测量

我们曾对福州铁路分局漳平供电段的华安、漳平牵引变电所进行实地测量。测量一天不同时刻的牵引母线电压和馈线电流。根据供电臂电流的测量数据,计算等值电流。在牵引变电所指定的某相,利用最小二乘拟合外特性一次式 $U = U_0 - XI_{eq}$ 。以误差最小为原则,借助 C 语言,求出空载电压 U_0 及内电抗 X ,绘出外特性曲线,如图 5 所示。

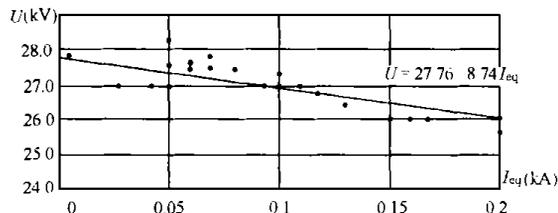


图 5 华安牵引变电所引前相外特性曲线

3.3 测量时注意事项及说明

(1) 测量应准确;

(2) 同时测量的数据最少有四个,尽可能做到同步;

(3) 负荷电流中具有高次谐波,测量时应滤波。

在不同工作相,牵引变电所变压器的二次空载电压 U_0 可以不同,但内电抗 X 应相同。

4 牵引变电所外特性在继电保护中的应用

由上述可见,牵引供电系统重要而实际的技术参数(如系统阻抗等)就摆在面前。如果铁路电气化工作者自己不去寻找,反而困难地向电力系统有关部门请求和索取,或者继续沿用初步设计时的过时数据,那就很不明智了。

根据实测求解得到的系统阻抗,可以进一步求得牵引母线的最大、最小短路电流和供电臂末端的最小短路电流,以便计算牵引变电所有关保护的整定值。与设计院提供的整定值进行比较,并及时纠正,从而确保各种保护不误动、不拒动。

以华安牵引变电所为例,1999年4月14日实测求得的系统阻抗 X_s 比设计院初步设计时向电力部门获得的系统阻抗小。这意味着在牵引母线发生三相短路时,实际短路电流比设计院提供的大,则变压器差动保护的不平衡电流增大。此时,为保证变压器主保护的動作可靠性,应重新计算差动保护的動作电流,确定各线圈的匝数,及时纠正继电器的整定值,否则可能会造成差动保护误动。

若实测求得的系统阻抗大于电力部门提供的数值时,则应校核变压器差动保护、高压侧 110kV (或 220kV) 和牵引侧 27.5kV 低电压起动过电流保护的灵敏度,否则可能会造成保护拒动。

实际求得的系统阻抗比设计时的数值偏大或偏小时,还会影响牵引变电所动力变压器电流速断及过电流保护整定值的准确性。我们关于上述继电保护问题的具体分析,此地从略。

参考文献:

- [1] 李自良,陈薇. 电气网络若干特殊问题的分析与判断. 北京:铁道学报,1996,(6).
- [2] 李自良,陈薇. O
1995,(5):64~67.
- [3] , ,
,1982,(2):23~25.
- [4] , ,
25kV,
,1985,(9):60~62.

The theory of external performance of traction substation and its appliance in relay protection

CHEN Wei

(Electric Engineering Department, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: On the basis of the circuit theory, electromechanics and practical state of the electrified railways, we have made up equivalent circuit of three-phase traction substations and traction power supply systems and have got external performance curves. At the same time, important practical values of the equivalent calculation circuit and external performance curves have been expounded in the design, motion and relay protection setting for the electrified railways.

Keywords: electrified railway; traction substation; equivalent circuit; external performance; relay protection