

用 ETAP 软件进行交流电气化铁道牵引供电系统 建模和分析的方法

前言

我国幅员辽阔，资源丰富但分配不均，加上数量巨大的流动人口，使得铁路运输在中国国民经济中起着不可替代的作用。到 2010 年年底，我国已经通车的铁路里程超过 9 万公里，其中电气化铁路达 2.6 万公里，到 2020 年将达到 12 万公里，其中电气化铁路里程将达到 60%。

目前我国给电气化铁路使用的是工频单相 25kV 交流电，牵引机车大多是直流牵引电动机。电气化铁路供电系统主要由牵引变压器、牵引母线和整流器组成。牵引变压器把电力系统（一般为 110kV 或 220kV）送来的三相电转换成适合电力机车使用电压的单相交流电，整流器把单相交流电转换成直流电供直流牵引电动机使用。如图 1。

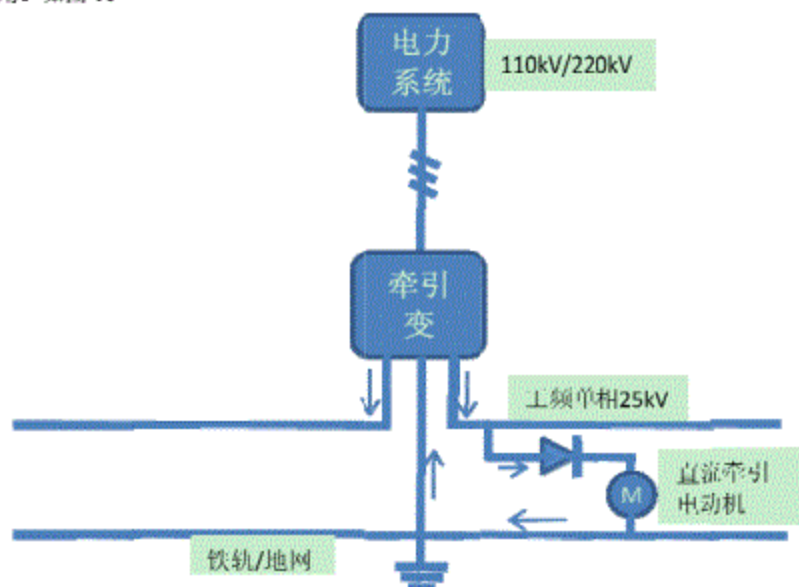


图 1. 电气化铁道供电原理图

牵引变把三相电变成单相电时，会造成电力系统三相不平衡，产生负序和零序电流；整流器会产生高

次谐波流入系统。所以当电气化铁路接入电力系统前有必要对接入后的在系统侧产生谐波和三相不平衡情况进行仔细分析,研究相关的对策,保证电力系统的安全稳定运行和良好的供电质量。

手工分析电力系统谐波和不平衡相当烦琐,而且容易出错,借助软件来完成这些分析可以克服这些困难。ETAP 就是一款专门用于电力系统分析计算的工具有,它由美国 OPERATION TECHNOLOGY, INC.在 1986 年开发完成,经过 20 多年的更新换代后已经成为了全世界最流行的电力系统分析计算软件之一。在中国,江苏电力试验研究院、浙江电力科学研究院、湖南湘电试验研究院等大型电力研究部门已经使用 ETAP 做了大量的电气化铁路牵引供电系统接入电力系统的谐波和不平衡研究,效果不错。

在我国铁路牵引供电系统中常用的牵引变压器有单相变压器、单相 VV 变压器、三相 VV 变压器、三相 $Y_N/d11$ 变压器、Scott 变压器、 Y_N/∇ 变压器等。由于 ETAP 里没有这些牵引变压器的现成模型,分析时不能直接建立牵引系统模型,需要做一些变换处理。本文分析了常用几种牵引变的工作原理后,给出了在 ETAP 里分析电气化铁路接入系统后不平衡和谐波时,它们的模型的处理方案。希望能给从事电气化铁道接入系统研究的同仁们一点帮助。

2. 不平衡模型

2.1 单相变压器

牵引供电系统中的单相变压器高压侧接在三相电力系统的两相母线上,如图 2。它对于电力系统来说是一个两相负荷。

在 ETAP 里可以通过相位适配器把三相系统转换成两相系统,相别根据实际情况选择,如图 3。在两相系统中接入的变压器就是单相变压器,变压器的参数和负荷数据根据实际情况填写。用这个模型 ETAP 可以计算出高压侧各相电流和负序电流。

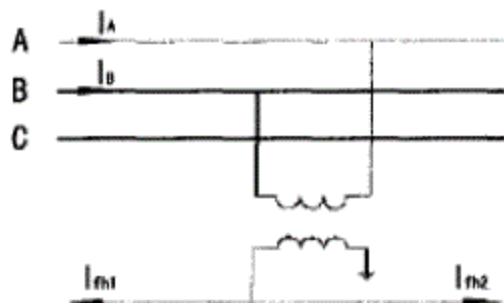


图 2 单相变压器接线图

批注 [x1]: P17, 牵引负载对电力系统而言属于纯单相负载。



图 3. 单相变压器 ETAP 模型

模型测试:

单相变高压侧额定电压 220kV，低压侧额定电压 27.5kV，变比 $K=220KV/27.5KV=8$ 。牵引负荷取 5000kVA，电流 $I = \frac{5000kVA}{27.5kV} = 182A$ ；忽略变压器空载电流，单相变高压侧电流 $I' = \frac{181A}{8} = 23A$ 。用 ETAP 测试结果为 $I = 194.6A$ ； $I' = 24.3A$ ，与手算结果吻合。电流有点偏差是由于牵引母线电压潮流计算结果是 26.2kV，不是手算用的 25kV。

批注 [x2]: 是否手动调节到 25kV

2.2 单相 V/v 变压器

单相 V/v 变压器实际上是两台单相变压器作 V/v 连接。两台单相变压器高压侧绕组分别接在电力系统的 BC 相和 AC 相上，低压侧各有一端接在两相牵引母线上，另一端接铁轨或地网，如图 4。相当于 AC 相和 BC 相各向一边供电，相当于两个两相负荷。

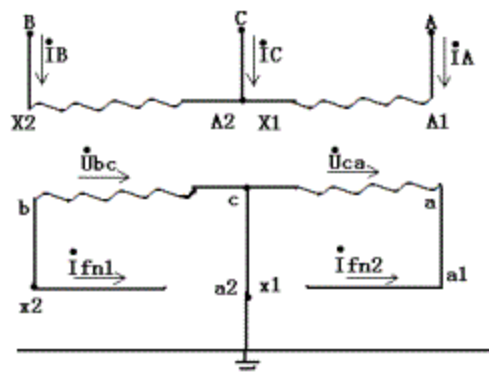


图 4 单相 V/v 变接线图

在 ETAP 里建单相 V/v 变模型可以用两个单相变压器模型代替，用相位适配器分别把他们接到三相母线的 AC 和 BC 相上，如图 5。为了尽量减小高压侧不平衡情况，实际系统中接入系统的相别会轮换，建模时相别选择需要根据实际情况进行，填入变压器参数和负荷数据就可以了。

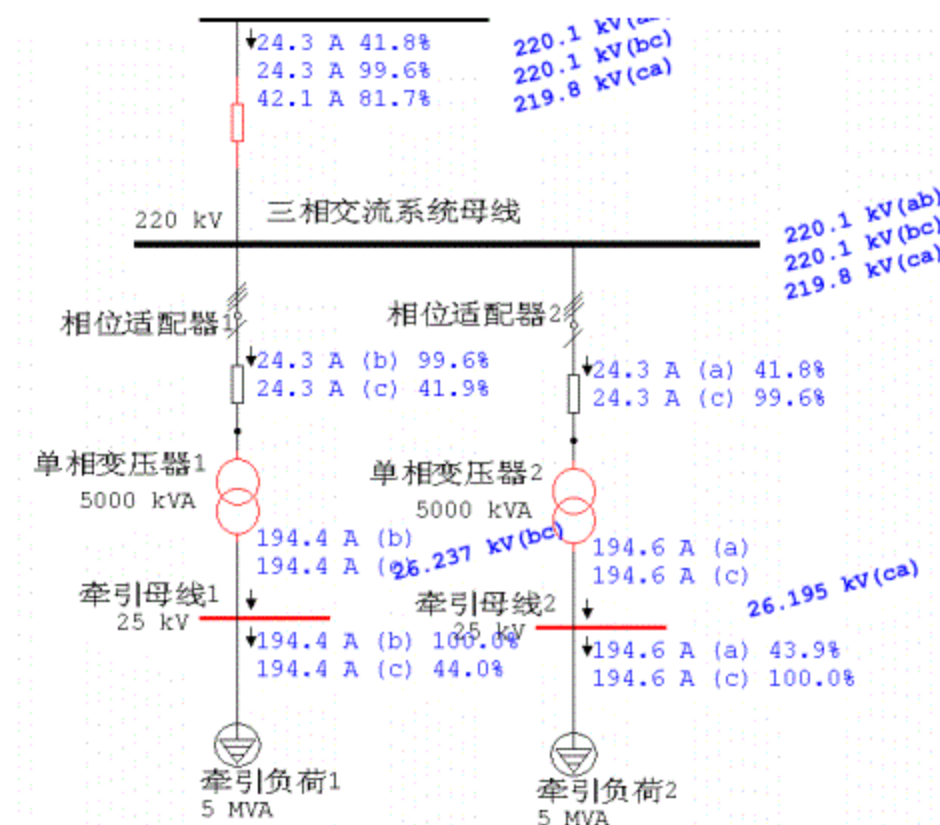


图 5 单相 V/v 变模型测试

模型测试：

取变压器高压侧额定电压 220kV，低压侧额定电压 27.5kV，变比 $K=220\text{kV}/27.5\text{kV}=8$ 。假设两供电臂负荷一样，都为 5000kVA，功率因数为 0.85。

牵引臂电流： $I = \frac{5000\text{kVA}}{27.5\text{kV}} = 182\text{A}$ 。高压侧电流 $I_A=I_B=182\text{A}/8=23\text{A}$

由于两臂电流功率因数都一样，所以他们的角度差是 60 度，所以高压侧电流

$$I_C=23\text{A}\times\sqrt{3}=40\text{A}$$

ETAP 计算结果如图 5， $I_A=I_B=24.3\text{A}$ ， $I_C=42.1\text{A}=\sqrt{3} I_A$ 。ETAP 计算结果与手算结果吻合。

2.3 三相 V/v 变压器

三相 V/v 变压器是近年来新研制的变压器，它将两台容量相等或不等的单相变压器器身安装在同一油箱内。原理接线图如图 6。一次绕组接成固定的“V”型连接，“V”的顶点为 C 相，A₁、X₂ 分别接在 A 相和 B 相上。二次绕组四个端子全部引出油箱外，根据牵引要求可以接成正“V”（a₂x₁ 接到 C 相，作为顶点）和反“V”（a₁x₂ 接到 C 相，作为顶点）。

从接线图上看三相 V/v 变和单相 V/v 变原理一样，在 ETAP 里建模方法也一样。在这里不在重复。

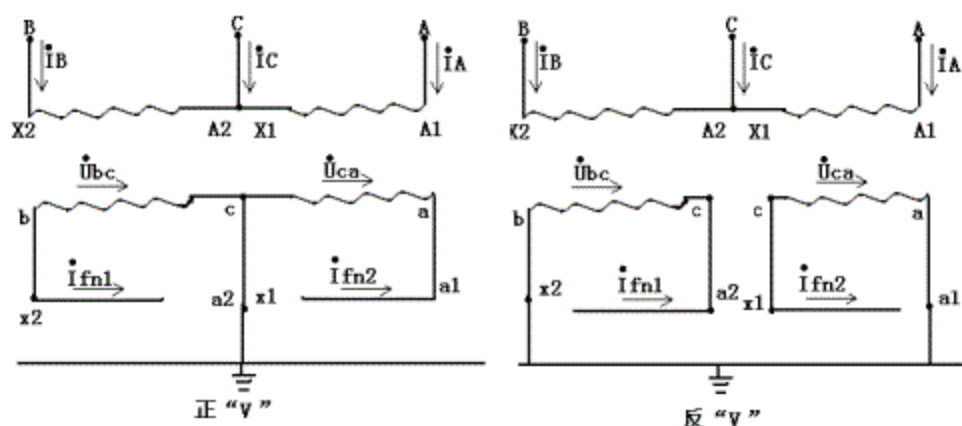


图 6 三相 V/v 变接线图

2.4 Yn,d11 变压器：

批注 [x3]: 三相

Yn,d11 牵引变高压侧绕组“Y”形连接，接到三相电力系统，低压侧“Δ”形连接，其中一角（如 C）接轨道或地网；另两角（如 A、B）接牵引侧的两相母线，由两相牵引母线分别向两侧相应的供电臂供电，如图 7。为了尽量减小电力系统三相不平衡度，实际接线中会轮换选择“Δ”形绕组的角接地。

根据以上原理描述，在 ETAP 里可以用一个高压侧绕组“Y”形连接，低压侧绕组“Δ”形连接的双绕组变压器模拟来模拟，并且设置成标准正序（低压侧电压滞后高压侧电压 30 度），在低压侧母线上通过相位适配器接两个两相负荷。

以 C 角接铁轨为例（如图 7）进行模型分析：

高压侧电压 U_A 、 U_B 、 U_C 是电力系统三相对称电压，两供电臂的供电电压分别是 U_a 和 U_c 。

两供电臂电流分别是 I_b' 和 I_a' ，二次绕组中流过的电流 I_{ca}' 、 I_{ab}' 和 I_{bc}' 与供电臂电流 I_b' 和 I_a' 之间有以下关系：

$$\begin{pmatrix} I_{ca}' \\ I_{ab}' \\ I_{bc}' \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a' \\ I_b' \\ I_c' \end{pmatrix} \quad (1)$$