

平衡牵引变压器电磁平衡关系分析

钮承新

(兰州铁路局机务处,甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对平衡变压器磁势、电流、电势、功率平衡关系分析和推导,结合 YN、A 接线平衡变压器科研课题的研究,论述了平衡牵引变压器基本原理。

关键词: 平衡; 变压器; 电磁; 关系

中图分类号: TM922.73

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2001)01-0022-04

1 前言

我国电气化铁路牵引变电所大多数采用 YN, d11 接线普通电力变压器,其容量利用率为 75.6%。因牵引负荷产生的负序电流分量较大,使变压器原边 110kV 三相电流不对称,影响电力系统电能质量。

平衡牵引变压器是我国近几年研制出的新型牵引变压器,这种变压器具有较高的容量利用率,将牵引供电二相视在功率转化为三相视在功率,实现二相不对称的电力机车牵引负荷转化为三相对称系统。还可抑制电力机车不平衡牵引负荷所产生的负序电流,有效减少负序电流分量。国外生产的斯科特(Scott)、李勃伦克(Le Blanc)牵引变压器能减小负序电流,但中性点不能引出,不适应中性点接地的电力系统,其副边无三角形回路,励磁所需三次谐波电流没有通路,增大了磁通和电动势中的三次谐波分量,将引起附加发热和恶化波形。大容量伍德桥(Wood brige)变压器采用星-菱形接线,原边可以抽出中性点,容量利用率仅为 50%,须另设一台自耦变压器,用于升高电压,故设备投资高,占地面积较大。上述国外生产变压器均不能满足我国电气化铁路发展的需要。研制和生产三相变二相平衡牵引变压器,对促进我国电气化铁路发展,具有十分重要意义。

2 平衡牵引变压器绕组接线

平衡变压器原边接成星形,其绕组匝数为 W_1 。副边接成三角形,三角形各绕组匝数为 W_2 。在三角形两个角各连接外延绕组,可构成平衡变压器。当连接一组平衡绕组 W_3 ,并将 W_3 与三角形 ab 绕组绕制在同一个铁芯柱上,构成 Y/V 接线阻抗匹配型平衡变压器(图 1),简称 Y/V 接线。当在平衡绕组的

基础上再连接补偿绕组 W_4 ,并使 W_4 分别绕制在 ac 和 bc 绕组所在的铁芯柱上,则构成 YN、A 接线平衡变压器(图 2),简称 YN、A 接线。Y/V 和 YN、A 两种平衡变压器接线,都是在 YN,d11 接线变压器的基础上演变而来,其 Y/ 部分与普通 YN,d11 接线变压器相同,不同的是在副边三角形上增加外延绕组,改变了变压器副边电磁关系。变压器原边接三相 110kV 对称系统(相位差 120 度),副边两个供电臂电压为 27.5kV,形成相位差为 90 度的二相系统,并使原边三相电流保持对称。

2.1 Y/V 接线阻抗匹配平衡牵引变压器

Y/V 接线变压器(图 1)是利用阻抗匹配的方法,使副边三角形 ab 绕组阻抗为 ac 或 bc 绕组阻抗的 R 倍,构成阻抗匹配型平衡变压器。平衡绕组 ad 或 be(W_3)与 ac 或 bc(W_2)绕组的匝数比和阻抗匹配系数分别为:

$$\begin{cases} R_2 = W_3 / W_2 = \frac{1}{2}(\sqrt{3} - 1) \\ R = \sqrt{3} + 1 \end{cases}$$

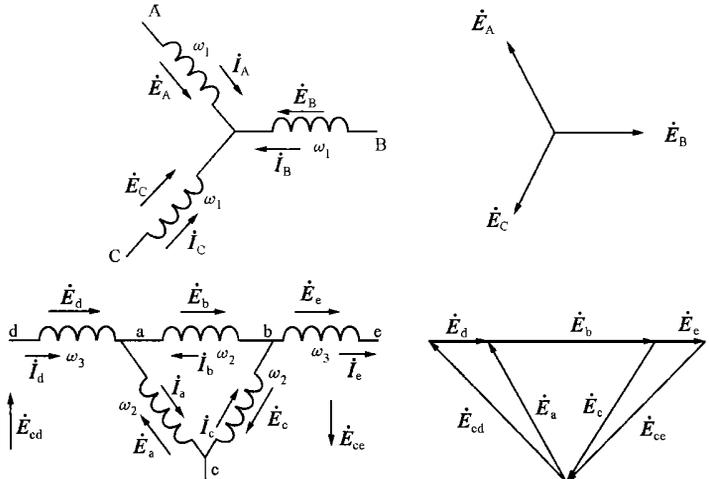


图 1 阻抗匹配型平衡变压器绕组接线图及向量图

式中:

W_2 与 W_3 为副边绕组匝数, 其为固定参数。

R 为阻抗匹配系数或漏抗系数。

R_2 为电压系数。

式中, R_2 、 R 都可为固定数值。绕组匝数的配合容易实现, 但阻抗匹配系数 R 的确定较为困难, Y/V 接线阻抗匹配平衡变压器要求 R 必须等于 $\sqrt{3} + 1$, 当 R 偏离这个数值, 则失去平衡性能。由于 R 的严格限制, 给变压器设计及生产工艺带来困难。当变压器原边线电压 (U_{AB}) 为 110kV, 副边电压 (U_{cd}) 为 27.5kV, 低压绕组 U_{ab} 为 22.454kV、 U_{da} 为 8.219kV, 低压侧相间电压 U_{de} 为 38.891kV。

我局夏官营、石空、青铜峡变电所安装 Y/V 接线阻抗匹配平衡牵引变压器。

2.2 YN、A 接线平衡牵引变压器

YN、A 接线是在 Y/V 接线基础上发展起来的平衡变压器, 是一种理想的平衡变压器接线 (图 2)。其阻抗匹配系数 R 与副边绕组 ac (W_2)、bc (W_2)、ab (W_2) 和平衡绕组 ad 或 be (W_3)、df 或 eg (W_4) 关系如下:

$$R_2 = W_3 / W_2 = \sqrt{3} / (R + 2)$$

$$R_3 = W_4 / W_2 = (1 + \sqrt{3} - R) / (R + 2)$$

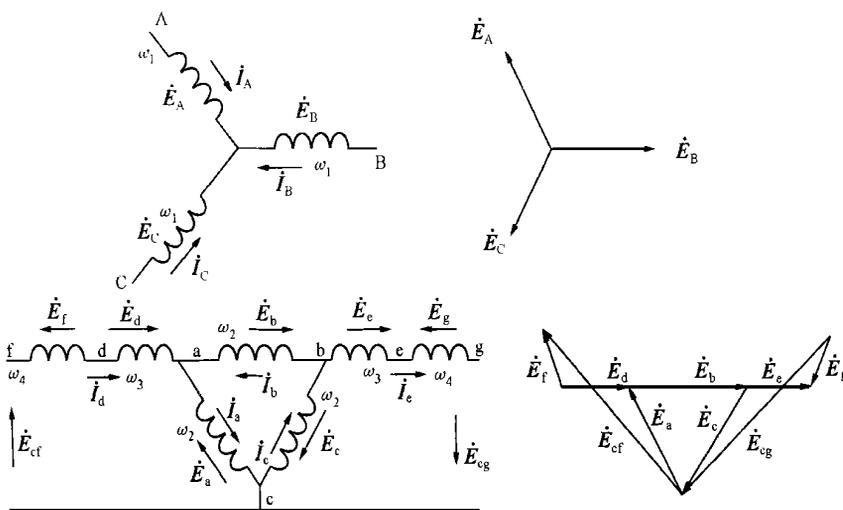


图 2 YN、A 接线平衡变压器绕组接线图及向量图

式中, R_2 、 R_3 为电压系数。

若 $R_2 = R_3 = \sqrt{3}/3$ 时, 则 $R = 1$, 构成 YN、A 接线平衡变压器。这种平衡变压器不需要专门进行阻抗匹配, 设计和制造也相对容易。当变压器原边接入对称电力系统三相电源时, 通过电压系数 R_2 与 R_3 的配合, 使副边两供电臂输出电压幅值相等, 并且相

位差为 90 度, 实现平衡变压器一项基本功能。当副边供电臂电流相等时, 再通过 R 、 R_2 和 R_3 三个参数相配合, 使原边三相电流对称。当变压器原边电压 U_{AB} 为 110kV, 副边 U_{cg} 为 27.5kV, 低压侧相间电压 U_{fg} 为 38.891kV。三角形 U_{ab} 电压为 14.235kV。 U_{ab} 可以接入电容补偿装置, 用来提高功率因数和进行滤波。

电压系数 R_2 、 R_3 与阻抗系数 R 之间不同参数的配合, 理论上可以构成系列平衡变压器, 工程实际应用中, R 、 R_2 、 R_3 按下列参数配合, 具有实用价值, 即:

$$R = 1, \quad R_2 = R_3 = W_3 / W_2 = W_4 / W_2;$$

$$\text{或 } R = \sqrt{3} + 1, \quad R_2 = W_3 / W_2$$

由兰州局机务处和银川变压器厂共同研制的 SFQY31500/110 型 YN、A 接线平衡牵引变压器, 1996 年在陇西变电所试运行成功, 并在皋兰、玉泉营、银川、平罗等变电所安装。这个科研项目获得九七年度兰州局科技进步二等奖。YN、A 接线平衡变压器接线方式较为简单, 特别是 YN、A 接线平衡变压器, 取漏抗为 $R = 1$, 使三角形的三个绕组具有相同的漏抗, 不需要专门进行阻抗匹配, 给变压器设计和制造上带来方便。

3 平衡变压器基本电磁关系

根据变压器原、副边电磁关系和平衡变压器原理接线图 (图 1、图 2), 设变压器原边绕组为 W_1 , 副边三角形内绕组为 W_2 , W_3 为平衡绕组, W_3 绕制在 ab 绕组铁芯柱上。 W_4 为补偿绕组, W_4 增加在 ac、bc 绕组铁芯柱上, 供电臂电流 I_d 、 I_e 通过 ac、bc 绕组时, 对 ac、bc 绕组产生补偿磁势。当 $W_4 = 0$ 时, 构成 Y/V 型接线。忽略励磁电流, 平衡变压器磁势平衡方程式为 (以 YN、A 型接线为例):

$$\begin{cases} \dot{I}_A W_1 - W_2 \dot{I}_a - W_4 \dot{I}_d = 0 \\ \dot{I}_B W_1 - W_2 \dot{I}_b + W_3 (\dot{I}_d + \dot{I}_e) = 0 \\ \dot{I}_C W_1 - W_2 \dot{I}_c - W_4 \dot{I}_e = 0 \end{cases} \quad (1)$$

(1) 式中:

\dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 为原边 A、B、C 各绕组中电流;

\dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 为副边三角形绕组内各支路电流;

\dot{I}_d 、 \dot{I}_e 为供电臂中电流(平衡绕组和补偿绕组中电流)。

W_1 ——原边绕组匝数;

W_2 ——副边(三角形)绕组匝数;

W_3 ——平衡绕组匝数;

W_4 ——补偿绕组匝数。

4 平衡变压器电流变换关系

在副边三角形内,设阻抗 $Z_{ac} = Z_{bc} = Z_1$, $Z_{ab} = RZ_1$,按照 \dot{I}_d 、 \dot{I}_e 在三角形内各支路上电流分配关系,在各支路利用叠加原理的方法,得到三角形绕组内各支路电流 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c ,即:

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_d \frac{R+1}{R+2} - \dot{I}_e \frac{1}{R+2} \\ \dot{I}_b = -\dot{I}_d \frac{1}{R+2} - \dot{I}_e \frac{1}{R+2} \\ \dot{I}_c = -\dot{I}_d \frac{1}{R+2} + \dot{I}_e \frac{R+1}{R+2} \end{cases} \quad (2)$$

(2)式中, R 为三角形绕组漏阻抗,将(2)式代入(1)式,得:

$$\begin{cases} \dot{I}_A W_1 = W_2 [\dot{I}_d (\frac{W_4}{W_2} + \frac{R+1}{R+2}) - \dot{I}_e \frac{1}{R+2}] \\ \dot{I}_B W_1 = W_2 [\dot{I}_d (-\frac{1}{R+2} - \frac{W_3}{W_2}) - \dot{I}_e (\frac{1}{R+2} + \frac{W_3}{W_2})] \\ \dot{I}_C W_1 = W_2 [-\dot{I}_d \frac{1}{R+2} + \dot{I}_e (\frac{R+1}{R+2} + \frac{W_4}{W_2})] \end{cases} \quad (3)$$

5 平衡变压器原、副边电流线性变换关系

根据上述推导,由(3)式可得到原边电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 与副边供电臂电流 \dot{I}_d 、 \dot{I}_e 的线性关系如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{W_2}{W_1} \begin{bmatrix} \frac{R+1}{R+2} + \frac{W_4}{W_2} & -\frac{1}{R+2} \\ -\frac{1}{R+2} - \frac{W_3}{W_2} & -\frac{1}{R+2} - \frac{W_3}{W_2} \\ -\frac{1}{R+2} & \frac{R+1}{R+2} + \frac{W_4}{W_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

当变压器副边负荷相等,即 $\dot{I}_d = \dot{I}_e$ 。原边三相电流保持平衡,即 $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ 。(4)式各列之和为零,则解得:

$$\frac{R-1}{R+2} = R_2 - R_3$$

因 $W_3 = W_4$,所以 $R_2 = R_3$ 。求解上式得阻抗系数 $R = 1$ 。

设变压器变比 $K = W_1 / W_2$,将 $R = 1$, $W_3 / W_2 = W_4 / W_2 = \sqrt{3}/3$ 代入(4)式得:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} 2 + \sqrt{3} & -1 \\ -(\sqrt{3} + 1) & -(\sqrt{3} + 1) \\ -1 & 2 + \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

5.2 Y/V 接线阻抗匹配平衡变压器

Y/V 接线阻抗匹配平衡变压器没有 W_4 绕组,即 $W_4 = 0$ 。代入(4)式得 Y/V 接线阻抗匹配平衡变压器电流变换关系式:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{W_2}{W_1} \begin{bmatrix} \frac{R+1}{R+2} & -\frac{1}{R+2} \\ -\frac{1}{R+2} - \frac{W_3}{W_2} & -\frac{1}{R+2} - \frac{W_3}{W_2} \\ -\frac{1}{R+2} & \frac{R+1}{R+2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

当 $\dot{I}_d = \dot{I}_e$ 时,平衡变压器原边星形接线的三相电流应保持平衡,即三相电流之和为零。令(6)式各列元素之和为零,将 $W_3 / W_2 = (\sqrt{3} - 1)/2$ 代入(6)式,可解出 Y/V 型变压器阻抗匹配系数 R :

$$R = 1 + \sqrt{3}$$

由以上计算可得 Y/V 接线阻抗匹配平衡变压器电流线性关系式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{6K} \begin{bmatrix} \sqrt{3} + 3 & \sqrt{3} - 3 \\ -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ \sqrt{3} - 3 & \sqrt{3} + 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

5.3 平衡牵引变压器接线比较

(4)和(6)式表明,无论负载电流 \dot{I}_d 和 \dot{I}_e 如何变化,变压器原边电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 都将保持平衡,无零序电流产生。供电臂负荷电流 \dot{I}_d 与 \dot{I}_e 相等时, \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 为对称三相系统,既无零序电流,也无负序电流。

当阻抗系数 $R = 1$ 时, $R_2 = R_3 = \sqrt{3}/3$,构成 YN, A 接线平衡变压器,这种变压器具有良好的技术经济效益。

当阻抗系数 $R = \sqrt{3} + 1$ 时:

$$R_2 = W_3 / W_2 = \frac{1}{2}(\sqrt{3} - 1); \quad R_3 = 0;$$

构成 Y/V 接线阻抗匹配平衡变压器。当系数 R 、 R_2 、 R_3 变化并满足(4)式时,变压器接线方式随之变化,理论上可以构成系列平衡变压器,但实际上只有 $R = 1$ 、 $\sqrt{3} + 1$ 、 $2\sqrt{3} + 1$ 三种特殊参数具有现实

意义,其中,前两者具有实用价值,分别由部分国内工厂生产。第三种接线变压器铜材利用率太低,无实用经济价值。

6 电势平衡关系

根据图 2 所示,电势变换关系如下:

$$\begin{cases} \dot{E}_{fc} = \dot{E}_a - \dot{E}_d + \dot{E}_f \\ \quad = \frac{1}{K} [(1 + R_3) \dot{E}_A - R_2 \dot{E}_B] \\ \dot{E}_{gc} = \dot{E}_c - \dot{E}_e + \dot{E}_g \\ \quad = \frac{1}{K} [(1 + R_3) \dot{E}_C - R_2 \dot{E}_B] \end{cases} \quad (8)$$

将 $R_2 = R_3 = \frac{\sqrt{3}}{3}$ 代入(8)整理得到原边和副边电势变换关系,因原边电势之和为零,即:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{fc} \\ \dot{E}_{gc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} 3 + \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 3 + \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

当原边三相系统对称时,即 $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$, (9)式表明变压器原边输入对称三相电势时,副边二相输出电势对称正交(夹角为 90°)且幅值相等。

7 功率变换关系

当变压器视在的副边供电臂负荷电流相等时,即: $\dot{I}_d = \dot{I}_e = j\dot{I}_2$ 时,

变压器原边三相电流:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = \dot{I}_1$$

原边三相视在功率 S_1 :

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{3 \cdot \sqrt{2} (\sqrt{3} + 1)}{(R + 2) K} \dot{E}_A I_1 \\ &= 2 E_a I_1 \end{aligned}$$

忽略绕组漏阻抗,副边系统两相视在功率:

$$S_2 = 2 E_a I_1$$

即: $S_1 = S_2$,原边三相制的视在功率完全转化副边两相视在功率。说明理论上平衡变压器的容量利用率为 100%。而 Y,d 接线变压器容量利用率仅为 75.6%。采用平衡变压器,安装容量可降低一个等级。例如,皋兰变电所原设计采用 2 台 40000kVA Y,d11 接线的普通变压器,后改用 2 台 31500kVA 的平衡变压器,每台减少容量 8500kVA。包兰线石兰段电气化改造时,原计划选用 YN,d11 接线变压器,后将皋兰、石空、青铜峡、玉泉营、银川、平罗、石嘴山

等 7 个所改用平衡变压器,变压器减少安装容量 77000kVA。根据现行二部制电价,变压器按容量收取基本电费,每个千伏安为 11 元。包兰线 7 个所采用平衡变压器,每年可节约基本电费支出 1016.4 万元,取得良好经济效益。

8 抑制负序电流

由于电力机车为单相不对称负荷,将在电力系统产生负序电流和负序电压。负序分量造成电力系统不平衡,使发电机发热、振动和容量利用率下降,容易引起继电保护装置误动作,给电力系统和广大用户带来极大的危害。YN,d11 普通变压器运行时,当二个供电臂负荷电流相等,其负序电流与正序电流相等。而平衡牵引变压器副边两供电臂电流相等时,原边三相电流为对称系统,无零序电流,也无负序电流。当两个供电臂电流不相等时,原边三相电流也基本形成对称系统,负序分量大幅度减少。当副边一相电流为另一相电流的 50% 时,YN,A 接线平衡变压器原边的负序电流比星三角形接线变压器原边的负序电流减少 24%。因减少负序成份,从而减少负序损耗,降低负序电流对电力系统的不良影响,改善牵引供电系统用电质量。

9 结论

根据平衡牵引变压器基本电磁理论的推导,说明该变压器容量利用率高,可降低变压器安装容量,减少基本电费支出,有效提高电气化铁路经济效益。还可抑制负序电流分量,改善牵引网用电质量,降低电力机车牵引负荷对电力系统的不良影响。牵引变电所安装平衡牵引变压器,具有良好的技术经济效益。推广平衡变压器,对促进电气化铁路快速发展有着十分重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 曹建猷. 电气化铁道供电系统. 中国铁道出版社, 1987.
- [2] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院. 电气化铁道设计手册——牵引供电系统. 中国铁道出版社, 1988.

收稿日期: 2000-08-17

作者简介: 钮承新(1960-),男,大学,工程师,从事电气化铁道牵引供电方面的研究。

(下转第 31 页)

DEM卡及其他串行口等组成,见图3。

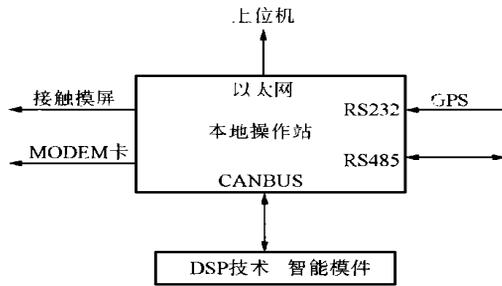


图3 网络联结技术

CAN总线在水电站中应用,具有更重要的作用。传统的水电站计算机监控系统,信息采集和输出命令有两种方式:

并行方式:采用多芯的信号电缆将被监控与监控设备(LCU)本体上的I/O插件相连,也是应用较多的方式,用于连接变送器、信号器及电磁阀等自动化元件,也用于连接调速器、励磁和保护等辅助设备,这种方法的缺点是需大量的电缆,导致成本提高,安装维护工作量大,当监控设备与被监控设备距离较远时,缺点尤为明显。

串行方式:如果调速器、励磁和保护等辅助设备是微机化的,那么就有可能实现它们与监控设备的串行通讯,这种方式可节省大量的电缆,但如果设备是由不同厂家提供,即使两端设备在物理层标准相同,实现通讯协议的一致也非易事。

现场总线出现后,这个问题可以通过如下方式

解决:

(1) 监控设备与被监控设备都直接挂接在由现场总线组成的网络上,通过现场总线实现信息采集与控制、调节。

(2) 监控设备与远程I/O挂接在现场总线组成的网络上,现场设备通过远程I/O上送信息,监控设备通过远程I/O下达控制命令。

最充分地利用了现场总线的优点,实现了彻底的分布,但有一个前提,被监控设备必须支持现场总线,但目前智能自动化元件还较少,实现PID调节的主要是调速、励磁和继电保护等辅助设备的监控,监控设备和调速、励磁、保护设备如果能支持多种现场总线,将会给用户带来很大的方便。

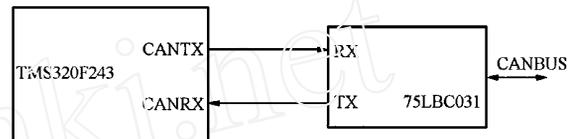


图4 DSP CAN接口

由于我们采用的TMS320F243芯片具有内置CAN模块,只需外接一片75LBC031数据收发器即可。

收稿日期: 2000-03-20; 改回日期: 2000-05-20

作者简介: 蔡献军(1967-),男,工学硕士,主任工程师,主要从事水电站自动化产品的开发与研制; 鞠云峰(1969-),男,工程师,主要从事水电站自动化产品的开发与研制。

Application of DSP and Site Bus technique in automation system of hydropower station

CAI Xian - jun, JU Yun - feng

(Acheng Relay Co., Ltd, Acheng 150302, China)

Abstract: The character of DSP and Site Bus technique, its application and prospect in automation of hydropower station are discussed in this paper.

Keywords: DSP technique; Site Bus technique; automation in hydropower station; unmanned/few manned

(上接第25页)

Analysis on the balance relationship of electro - magnetism for balance traction transformer

NIU Cheng - xin

(Lanzhou Railway Bureau, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The basic principle of balance traction transformer is presented in this paper by analyzing and deriving the balance relations among the magnetic potential, current, electric potential and power of the balance transformer combined with a certain project development.

Keywords: balance; transformer; electro - magnetism; relationship