

# YN, vd平衡变压器负序仿真分析

黄 军, 魏 光, 周 晋, 刘宇航

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:**首先分析了 YN, vd平衡变压器的接线原理。推导了 YN, vd变压器原次边电压和电流关系。结合负序电流的通用表达式, 讨论了在不同负荷条件下的原边电流不平衡度。最后利用 Matlab 结合某牵引变电所的实测数据仿真分析了变压器的负序情况, 并同 YN, d11 接线牵引变压器的实测数据进行了分析比较。

**关键词:**YN, vd平衡变压器; 负序电流; 不平衡度

**Abstract:** The connection principle of YN, vd is analyzed. The relationships between primary secondary currents and voltages are deduced. The unbalanced degrees of current in primary winding under different load conditions are discussed, which are based on the general expressions of negative phase sequence current. Finally, the simulation of negative phase sequence current of the transformer is performed with Matlab based on the measured data from a substation. And the simulation result is compared with the measured data of YN, d11 connected traction transformer.

**Key words:** YN, vd balance transformer; negative phase sequence current; unbalanced degree

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2009)02-0081-04

目前, 在中国现有电气化铁路中, 大部分牵引变电所采用的是 YN, d11 变压器。这种变压器由于结构性能的限制, 在高压侧存在严重的不对称, 有很大的负序电流, 对电力系统运行产生不良影响。

YN, vd平衡变压器是一种结构简单、设计制造容易、性能优良、经济效益好的三相变两相变压器。它具有平衡变压器的优点: 原边中性点可直接接地, 次边有三角联接回路, 不需要进行阻抗匹配且两相电路完全独立, 适用于电气化铁道采用 BT 或者 AT 供电方式。三相到二相间的对称变换, 能有效减弱负序对电力系统的影响。现对 YN, vd平衡牵引变压器的负序特性进行分析。

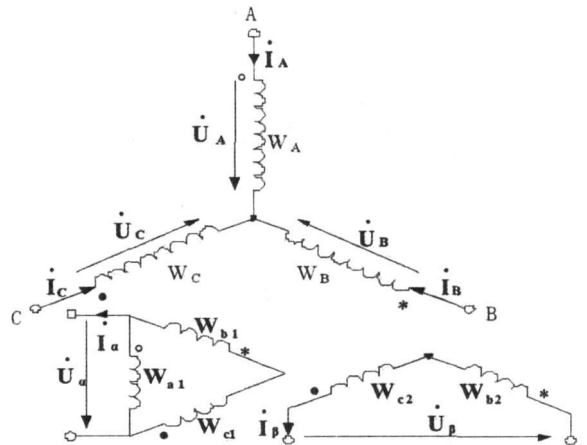


图 1 YN, vd变压器接线原理图

根据图 1 中标注的电压、电流方向, 由电流平衡和磁势平衡关系式, 可得原次边电流关系如下。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3K_1} & 0 \\ -\frac{1}{3K_1} & -\frac{1}{K_2} \\ -\frac{1}{3K_1} & \frac{1}{K_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $K_1 = W_A / W_{a1}$ ;  $K_2 = W_A / W_{b2}$ 。

根据平衡变压器的工作原理: 当三相变两相的时候, 绕组接线应使二次侧两相电压大小相同、方向相差  $90^\circ$ 。由此可得  $W_{b1} = \sqrt{3}W_{b2}$ 。

设 K 为高压侧线电压和低压侧电压之比。式

## 1 YN, vd平衡变压器基本原理

### 1.1 接线原理图

图 1 中,  $W_A, W_B, W_C$  为变压器一次侧三相绕组的匝数, 其大小关系是  $W_A = W_B = W_C$ 。  $W_{a1}, W_{b1}, W_{c1}$  是变压器二次侧 A 相的匝数, 其大小关系是  $W_{a1} = W_{b1} = W_{c1}$ 。  $W_{b2}, W_{c2}$  是变压器二次侧 B 相的匝数, 其大小关系是  $W_{b2} = W_{c2}$ 。在实际变压器中,  $W_A, W_{a1}$  绕在 A 相心柱上;  $W_B, W_{b1}, W_{b2}$  绕在 B 相心柱上;  $W_C, W_{c1}, W_{c2}$  绕在 C 相心柱上。

### 1.2 YN, vd原次边电压、电流关系

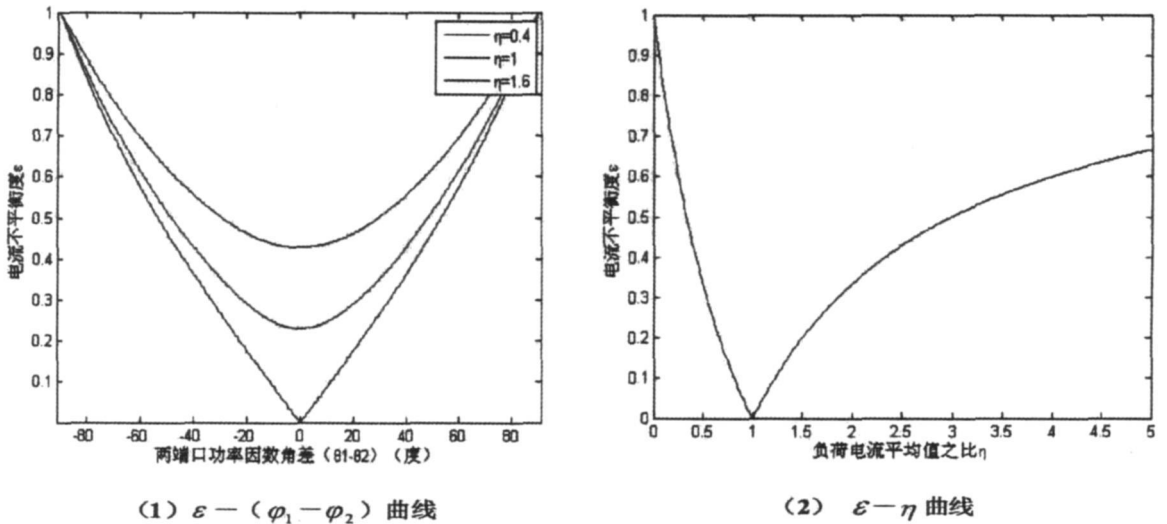


图 2  $K_{\epsilon 1}=1, K_{\epsilon 2}=1$  时电流不平衡度曲线

(1)可改写为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ -1 & -\sqrt{3} \\ -1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_p \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

同理,根据图 1 可以推导出电压关系如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2 负序电流的一般表达式

在文献 [1] 中,用系统变换的方法来推导出了正序、负序电流的一般表达式<sup>[1]</sup>。

$$\dot{I}^{(+)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^n K_p I_p e^{-j\varphi_p} \quad (4)$$

$$\dot{I}^{(-)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^n K_p I_p e^{-j(2\psi_p + \varphi_p)} \quad (5)$$

式中:  $\psi_p$  为  $\dot{U}_p$  滞后  $\dot{U}_A$  的相角 (称为端口 p 的接线角,且滞后为正);

$K_p$  为牵引侧端口电压 ( $U_p$ ) 与一次侧线电压 ( $\sqrt{3} U_A$ ) 之比;

$\varphi_p$  为端口 p 电流  $I_p$  滞后端口 p 电压  $\dot{U}_p$  的功率因数角。

对应正序电流和负序电流的方均根值,可表示

为:

$$I_k^{(+)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \sum_{p=1}^n (K_p K_{\epsilon_p} I_p)^2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n K_k I_k K_l I_l \cos(\varphi_k - \varphi_l) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$I_k^{(-)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \sum_{p=1}^n (K_p K_{\epsilon_p} I_p)^2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n K_k I_k K_l I_l \cos(2\psi_k + \varphi_k - 2\psi_l - \varphi_l) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中:  $K_{\epsilon_p}$  为端口负荷电流的有效值与平均值之比;  $I_p$  为端口负荷电流的平均值。

电流不平衡度<sup>[2]</sup>:

$$\epsilon_1 = \frac{I_k^{(-)}}{I_k^{(+)}} \times 100\% \quad (8)$$

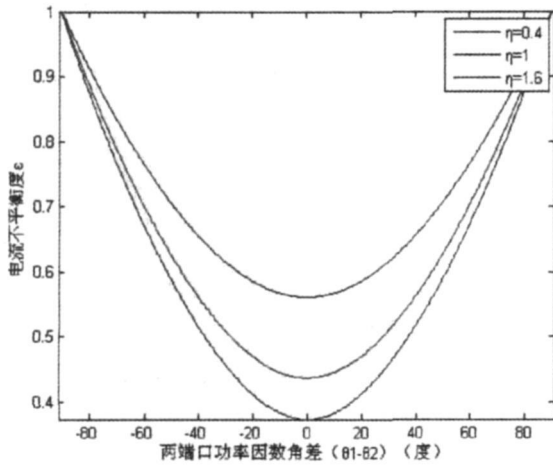
## 3 YN, vd 平衡变压器负序电流分析

### 3.1 YN, vd 平衡变压器负序电流表达式

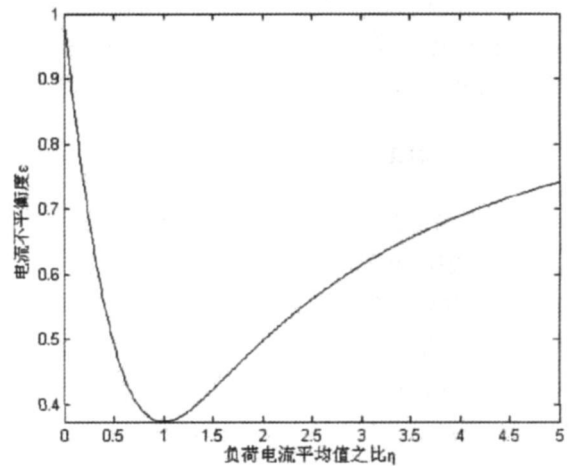
设牵引负荷端口数为 2 其接线原理图如图 1 所示。为通用起见,在式 (6)、(7) 中令  $\psi_1 = 0, \psi_2 = 90^\circ + \theta$ 。且令  $K_1 = K_2 = K, I_p / I_p = \eta$ 。代入相关的参数可从式 (6) 和式 (7) 中解得

$$I_k^{(-)} = \frac{K I_p}{\sqrt{3}} \sqrt{K_{\epsilon 1}^2 + K_{\epsilon 2}^2 \eta^2 - 2\eta \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (9)$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sqrt{K_{\epsilon 1}^2 + K_{\epsilon 2}^2 \eta^2 - 2\eta \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}}{\sqrt{K_{\epsilon 1}^2 + K_{\epsilon 2}^2 \eta^2 + 2\eta \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}} \quad (10)$$



(1)  $\epsilon - (\varphi_1 - \varphi_2)$  曲线



(2)  $\epsilon - \eta$  曲线

图 3  $K_{\epsilon_1} = 1.15, K_{\epsilon_2} = 1.15$  时电流不平衡度曲线

### 3.2 YN, vd平衡变压器的负序特性

利用 Matlab 分以下两种情况仿真分析了 YN, vd 平衡变压器负序电流引起的电流不平衡度问题。

1) 行车密度不大情况,  $K_{\epsilon_1} = 1, K_{\epsilon_2} = 1$

在图 2(1)中, 令  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  取值,  $\eta$  分别取 0.4、1、1.6。当两臂负荷的功率因数角相差  $0^\circ$  时, 电流不平衡度取得相应的最小值; 当两臂负荷相同时电流不平衡度为 0。

在图 2(2)中, 令  $\varphi_1 = \varphi_2, \eta$  在  $0 \sim 5$  取值。当  $\eta = 1$  时, 电流不平衡度取得最小值。

2) 机车密度较大情况,  $K_{\epsilon_1} = 1.15, K_{\epsilon_2} = 1.15$

在图 3(1)中, 令  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  取值,  $\eta$  分别取 0.4、1、1.6。当两臂负荷的功率因数角相差接近零度时, 电流不平衡度取得相应的最小值。但对比第一种情况时, 电流不平衡度有所增大。

在图 3(2)中, 当  $\eta = 1$  时, 电流不平衡度也取得最小值, 但也比第一种情况有所增大。

## 4 仿真分析

以某牵引变电所 (实际采用的是 YN, d11 接线形式) 两供电臂的一天 24 h 连续实测数据 (采样间隔为 3 s 共 28 800 个点) 作为负荷, 把牵引变电所 110 kV 母线作为电流不平衡的监测点。结合 YN, vd 变压器, 利用 Matlab 仿真分析了其电流不平衡度, 如图 4 所示。

该变压器 110 kV 侧三相电流不平衡度仿真结果为: 最大值为 276.5269%, 95% 概率大值为 122.0468%。

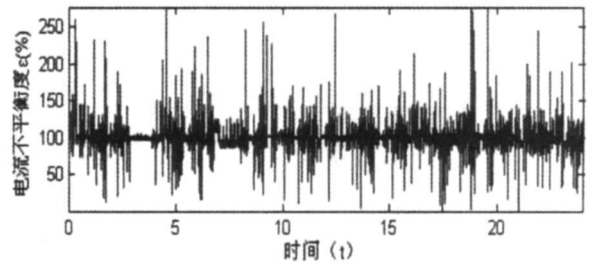


图 4 YN, vd 接线变压器三相电流不平衡度趋势图 (仿真)

为了说明 YN, vd 变压器能有效减弱负序电流, 统计了该变电所的 110 kV 侧实际的三相电流不平衡度情况: 最大值为 474.1530%, 95% 概率大值为 147.3592%。如图 5 所示。

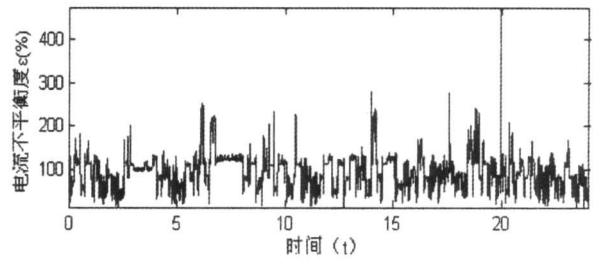


图 5 YN, d11 接线牵引变电所  
三相电流不平衡度趋势图 (实测)

## 5 结论

对比上面的结果, 可以看出: 当两种情况的负荷相同时, YN, vd 接线变压器的原边电流不平衡度比实际采用 YN, d11 接线的牵引变电所的原边电流不平衡度有所减小。这说明 YN, vd 变压器将是减少牵引负荷通过牵引变电所注入系统负序电流的理想变

器。在理想情况下,当牵引变电所两臂负荷的电流大小相等,两臂(端口)电压等量垂直时,牵引负荷通过牵引变电所注入系统的负序电流为零。

### 参考文献

[1] 李群湛. 电气化铁道并联综合补偿及其应用 [M]. 北京:中国铁道出版社, 1993.

[2] 林海雪. 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册 [S]. 北京:中国电力出版社, 2001.

[3] 刘光晔,周有庆,姚建刚. 新型平衡变压器的平衡条件及等值电路研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4):

84—88.

[4] 张丽艳,李群湛,余丹. 阻抗匹配平衡牵引变压器负序分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(6): 80—83.

[5] 简克良. 电力系统分析 [M]. 成都:西南交通大学出版社, 1992.

### 作者简介:

黄 军 (1983—),男,四川内江人,硕士研究生,研究方向为供电系统仿真与优化。

(收稿日期: 2008—12—15)

(上接第 23 页)

表 8 不同信息素初始化方案下的算法性能比较

n	1	2	3	4	5	8
最优值 /\$	19 115 19 002 19 036 19 100 19 001 19 337					
平均值 /\$	19 452 19 376 19 324 19 374 19 382 19 446					

### 参考文献

[1] Zio E, Barakli P, Pedroni N. Optimal power system generation scheduling by multi-objective genetic algorithms with preferences [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 432—444.

[2] 王欣,秦斌,阳春华,等. 基于混沌遗传混合优化算法的短期负荷环境和经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 128—133.

[3] Senjyu T, Shimabukuro K, Uezato K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 882—888.

[4] Snyder W L, Powell H D, Rayburn J C. Dynamic programming approach to unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 339—348.

[5] Hobbs W J, Hemon G, Wamer S, et al. An enhanced dynamic programming approach for unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(3): 1201—1205.

[6] Ongsakul W, Petcharak N. Transmission and ramp constrained unit commitment using enhanced adaptive Lagrangian relaxation [C]. Proceedings of IEEE Power Tech, Russia, 2005, 1—8.

[7] 杨朋朋,韩学山. 基于改进拉格朗日乘子修正方法的逆序排序机组组合 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 40—45.

[8] 张利,赵建国,韩学山. 考虑网络安全约束的机组组合新算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(21): 50—55.

[9] Damousis I G, Bakirtzis A G, Dokopoulos P S. A solution to the unit commitment problem using integer-coded genetic

algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1165—1172.

[10] 杨俊杰,周建中,喻菁,等. 一种求解大规模机组组合问题的混合智能遗传算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 47—50.

[11] 孙力勇,张焰,蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 82—87.

[12] Ting T O, Rao M V C, Loo C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 411—418.

[13] 胡家声,郭创新,曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24—28.

[14] 张力勇,张焰,蒋传文. 求解机组组合问题的嵌入贪婪搜索机制的改进粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(13): 44—48.

[15] 李鹏飞,都洪基,郭亮,等. 基于免疫算法的火电厂机组优化组合 [J]. 继电器, 2007, 35(S1): 365—368.

[16] Simon S P, Padhy N P, Anand R S. An ant colony system approach for unit commitment problem [J]. Electrical Power and Energy System, 2006(28): 315—323.

[17] 王琨,刘青松. 蚁群算法在电力系统机组优化组合中的应用研究 [J]. 电力学报, 2005, 20(2): 112—115.

[18] 熊伟清,魏平. 二进制蚁群进化算法 [J]. 自动化学报, 2007, 33(3): 259—264.

[19] 陈焯. 用于连续函数优化的蚁群算法 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 117—120.

### 作者简介:

蒲 实 (1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2009—01—12)