

[变压器]

一种基于YNd11变压器的无源补偿方案

文/国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 詹浩 彭朝亮 阮芹 陈红日 房体友 胡志武

在并联无功补偿理论基础上，分析了常见的YNd11接线变压器无源补偿方案，建立了补偿容量匹配表达式。无论何种类型电力负荷，均能实现对负序和无功的完备补偿。搭建MATLAB/Simulink仿真模型，进行了两种情况的仿真试验，试验结果验证理论的正确性。

在电力系统中不可避免地存在着大量的无功负荷，这些无功负荷来自电力线路、电力变压器以及用户的用电设备。由于电力线路、电力变压器和用户的用电设备主要是电感性的元件，其产生的电感性无功功率，不但会造成电能损耗、电压质量下降，而且还会占用变压器及线路容量。同时，当三相电力负荷不对称时，存在大量负序电流，对电力系统和相关设备造成巨大的危害。所以通常要在电力系统中并联连接电容（电抗）器用以补偿系统负序和无功。

本文在电力系统中大量使用的YNd11变压器的基础上，针对不同类型的电力负载，探讨了其无源

补偿方案，建立了补偿容量相关参数匹配方程。最后进行了相关仿真试验验证。

YNd11变压器的结构及负序补偿特性分析

YNd11变压器是电力系统中广泛使用的升压和降压设备，其接线如图1所示。其一次侧采用星形联结，中性点接地；二次侧采用三角形联结。一二次电流关系如式（1）所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{K_T} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据文献，任意接线变压器均可以得到统一的负序表达式。设一次侧三相电力系统是对称的电压源，其相电压、相电流分别为 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 和 $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$ 。设电力系统负荷电流及端口电压分别为 $\dot{I}_p$ 、 $\dot{U}_p$ ， $p=1, 2, \dots, n$ 。取 $\dot{U}_A$ 为参考向量，则有

$$[\dot{U}_A \ \dot{U}_B \ \dot{U}_C]^T = [1 \ a^2 \ a]^T \dot{U}_A \quad (2)$$

设二次侧端口电压与一次侧线电压 $\sqrt{3}\dot{U}_A$ 之比为 K_p ，则

$$K_p \triangleq \frac{U_p}{\sqrt{3}U_A} \quad p=1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

端口p的接线角 φ_p 为 $\dot{U}_p$ 滞后 $\dot{U}_A$ 的角度

$$\dot{U}_p = U_p e^{-j\varphi_p} = \sqrt{3}K_p U_A e^{-j\varphi_p} \quad (4)$$

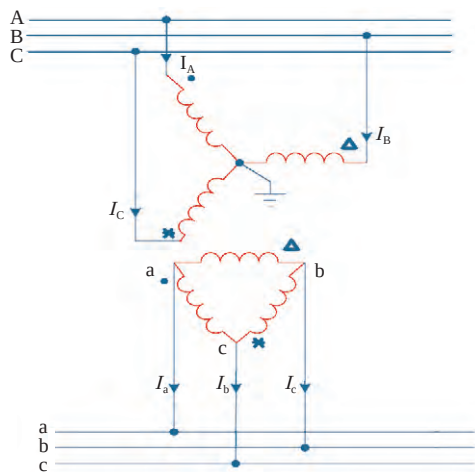


图1 YNd11变压器结构

当端口P的负荷功率因数角为 φ_p 时,有

$$\dot{i}_p = i_p e^{-j(\psi_p + \varphi_p)} \quad (5)$$

二次侧任一端口单独运行时都不在一次侧产生零序电流,由 $\dot{i}_p$ 造成的三相电流满足

$$\dot{i}_{Ap} + \dot{i}_{Bp} + \dot{i}_{Cp} = 0 \quad (6)$$

再从功率守恒原理

$$\dot{U}_A \dot{i}_{Ap}^* + \dot{U}_B \dot{i}_{Bp}^* + \dot{U}_C \dot{i}_{Cp}^* = \dot{U}_p \dot{i}_{Cp}^* \quad (7)$$

取共轭

$$\dot{U}_A^* \dot{i}_{Ap} + \dot{U}_B^* \dot{i}_{Bp} + \dot{U}_C^* \dot{i}_{Cp} = \dot{U}_p^* \dot{i}_{Cp} \quad (8)$$

因为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ e^{-j\psi_p} \\ e^{-j\psi_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -j \\ 0 & 1 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \cos\psi_p \\ \sin\psi_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

可解得

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{Ap} \\ \dot{i}_{Bp} \\ \dot{i}_{Cp} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ K_p i_p e^{-j\psi_p} \\ K_p i_p e^{j\psi_p} \end{bmatrix} \quad (10)$$

如果端口还有其它负荷,则利用叠加原理可得

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{p=1}^n K_p \dot{i}_p e^{-j\psi_p} \\ \sum_{p=1}^n K_p \dot{i}_p e^{j\psi_p} \end{bmatrix} \quad (11)$$

将其进行分解

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{A0} \\ \dot{i}_A^{(+)} \\ \dot{i}_A^{(-)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{i}_{A0} \\ \dot{i}_{A1} \\ \dot{i}_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} \quad (12)$$

于是得到任意接线变压器的正序电流和负序电流的表达式:

$$\dot{i}_A^{(+)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^n K_p i_p e^{-j\varphi_p} \quad (13)$$

$$\dot{i}_A^{(-)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^n K_p i_p e^{-j(2\psi_p + \varphi_p)} \quad (14)$$

用 $3U_A$ 乘以式(3)的共轭复数得到相应的正、负序复功率表达式:

$$S^{(+)} = \sum_{p=1}^n S_p e^{j\varphi_p} \quad (15)$$

$$S^{(-)} = \sum_{p=1}^n S_p e^{-j(2\psi_p + \varphi_p)} \quad (16)$$

式中,为二次侧端口输出功率模值。

基于YNd11变压器的无源补偿方案

为了对并联补偿作用于负序的效果进行控制或期望其达到一定的要求,则应对其补偿作用规定一个限值,这就是负序补偿度,用 K_N 表示。先把式(16)进行必要的整理。当作用于YNd11变压器时, $n=6$ 。设前3个端口为YNd11负荷端口,后3个端口为补偿端口。于是可重写式(16)如下

$$S^- = \sum_{p=1}^3 S_p e^{j(2\psi_p + \varphi_p)} + \sum_{p=4}^6 S_p e^{j(2\psi_p + \varphi_p)} \quad (17)$$

若记无补偿时的负序功率为 S_0^- ,则

$$S^- = \sum_{p=1}^3 S_p e^{j(2\psi_p + \varphi_p)} \quad (18)$$

于是定义负序补偿度 K_N 为

$$K_p \triangleq \frac{S_0^- - S^-}{S^-} = \frac{-\sum_{p=4}^6 S_p e^{j(2\psi_p + \varphi_p)}}{\sum_{p=1}^3 S_p e^{j(2\psi_p + \varphi_p)}} \quad (19)$$

即为安装补偿后负序补偿量(下降量)与原有负序的比值。为取得良好的补偿效果,通常取 $K_N \in [0, 1]$ 。其中 $K_N=0$ 对应无补偿情形, $K_N=1$ 是达到最好补偿效果,即完全补偿负序。

同样定义无功补偿度 K_C 为

$$K_C = \frac{-\sum_{p=4}^6 S_p \sin \varphi_p}{\sum_{p=1}^3 S_p \sin \varphi_p} \quad (20)$$

综合考虑 K_N 、 K_C 就能方便地导出对无功和负序实现综合补偿的计算模型。当电力负荷及其功率因数已知时,接线方式的确定又使接线角 ψ_p ($p=1, 2, 3$)成为已知,有效地利用设备容量仍在于尽可能有效地补偿电力负荷产生的负序功率,再兼补无功。将式(19)与式(20)联立,仍设3个端口均并入容性装置,即暂令 ψ_p ($p=1, 2, 3$),展开可得

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\sin 2\psi_4 & -\sin 2\psi_5 & -\sin 2\psi_6 \\ \cos 2\psi_4 & \cos 2\psi_5 & \cos 2\psi_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} K_C \sin 2\varphi_1 & K_C \sin 2\varphi_2 & K_C \sin 2\varphi_3 \\ K_N \cos(2\psi_1 + \varphi_1) & K_N \cos(2\psi_2 + \varphi_2) & K_N \cos(2\psi_3 + \varphi_3) \\ K_N \sin(2\psi_1 + \varphi_1) & K_N \sin(2\psi_2 + \varphi_2) & K_N \sin(2\psi_3 + \varphi_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

我们安排 S_1 、 S_4 在(A)相, S_2 、 S_5 在(B)相, S_3 、 S_6 在(C)相,YNd11变压器按照图1所示接线,即 $\psi_1 = \psi_4 = 0$, $\psi_2 = \psi_5 = 120^\circ$, $\psi_3 = \psi_6 = -120^\circ$ 。代入相关参数可从式(21)中解得补偿端口参数匹配方程:

$$\begin{bmatrix} S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} (K_C + 2K_N)\sin 2\varphi_1 & K_C\sin\varphi_2 + 2K_N\cos(\varphi_2 + 150^\circ) & K_C\sin\varphi_3 + 2K_N\cos(\varphi_3 + 30^\circ) \\ K_C\sin\varphi_1 + 2K_N\cos(\varphi_1 + 30^\circ) & (K_C + 2K_N)\sin 2\varphi_2 & K_C\sin\varphi_3 + 2K_N\cos(\varphi_3 + 150^\circ) \\ K_C\sin\varphi_1 + 2K_N\cos(\varphi_1 + 150^\circ) & K_C\sin\varphi_2 + 2K_N\cos(\varphi_2 + 30^\circ) & (K_C + 2K_N)\sin 2\varphi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

由上式可知:

(1) 对于可调补偿, 只要各端口补偿装置随着电力负荷的变化按上式调整, 其无功出力则能同时使无功补偿 (K_C) 和负序补偿 (K_N) 达到要求, 且 K_C 、 K_N 可独立地加以选择而互不影响。

(2) 对于不可调补偿, 则电力负荷应以其平均容量计入, 当无功补偿 (K_C) 和负序补偿 (K_N) 要求给定时, 由上式确定各端口补偿装置的计算容量, 同前, K_C 、 K_N 可独立地加以选择。

仿真验证

为了分析补偿方法的正确性和有效性, 使用 Matlab/simulink 对补偿方法进行仿真验证。YNd11 变压器额定电压为 220 kV/10 kV, 额定容量 63 MV·A。

1. 情况一

当次边三相只有 A 相有负荷时, 假设负荷容量 $S = 10 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 功率因数为 0.8 (滞后)。补偿前一次侧三相电压、电流和二次侧 A 相电压电流如图 2、图 3 所示。

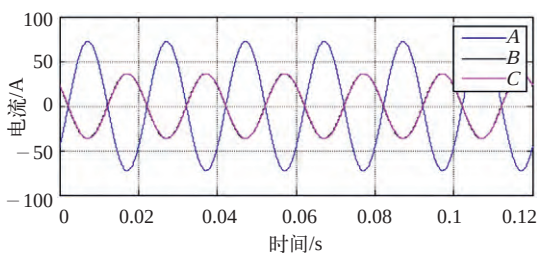


图2 补偿前YNd11变压器一次侧三相电流

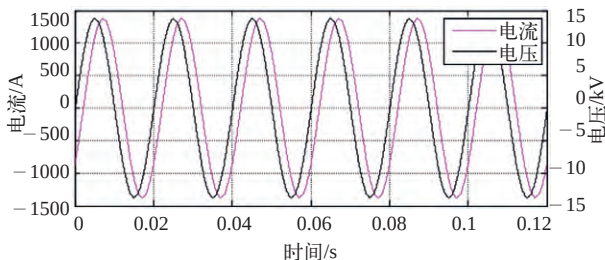


图3 补偿前YNd11变压器二次侧A相电压、电流

设定负序补偿度 $K_N = 1$, 无功补偿度 $K_C = 1$, 经式 (22) 计算, 得 $S_4 = 6 \text{ MVA}$, $S_5 = 4.62 \text{ MVA}$, $S_6 = -4.62 \text{ MVA}$, 即在 A 相并联 6 Mvar 的电容, B 相并联 4.62 Mvar 的电容, C 相并联 4.62 Mvar 的电感。仿真得出补偿后原边三相电流和次边电压、电流曲线如图 4、图 5 所示。

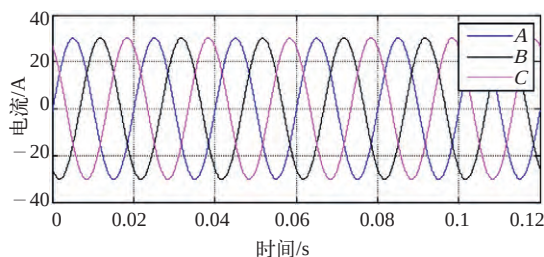


图4 补偿后YNd11变压器一次侧三相电流

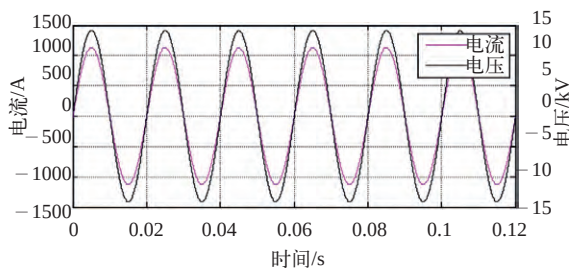


图5 补偿后YNd11变压器二次侧A相电压、电流

可见, 补偿装置投入后, 一次侧三相电流平衡, 负序为零; 二次侧电压电流同相位, 无功也得到了完全补偿。证明了方案的正确性。

2. 情况二

当次边三相均有负荷时: $S_A = 10 \text{ MVA}$, 功率因数为 0.8 (滞后), $S_B = 15 \text{ MVA}$, 功率因数为 0.8 (滞后), $S_C = 20 \text{ MVA}$, 功率因数为 0.8 (滞后)。补偿前一次侧三相电压、电流和二次侧各相电压电流如图 6、图 7 所示。

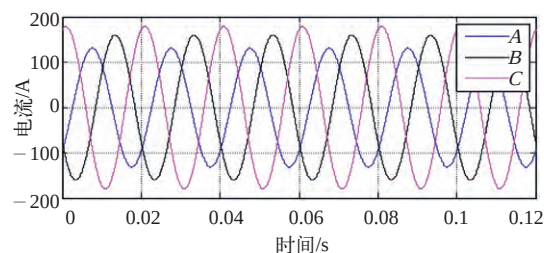


图6 补偿前YNd11变压器一次侧三相电流

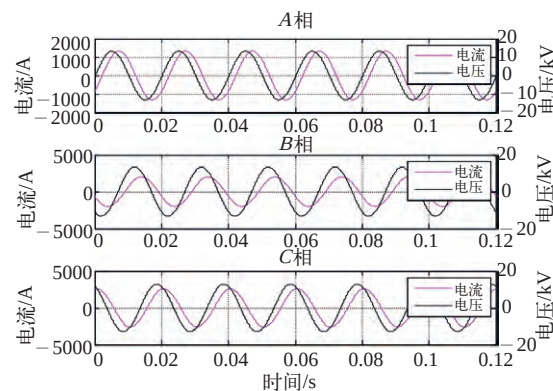


图7 补偿前YNd11变压器二次侧各相电压、电流

设定负序补偿度 $K_N=1$ ，无功补偿度 $K_C=1$ ，经式(22)计算，得 $S_4=8.3093\text{MV}\cdot\text{A}$ ， $S_5=4.38\text{MV}\cdot\text{A}$ ， $S_6=14.3093\text{MV}\cdot\text{A}$ ，即在A相并联8.3093Mvar的电容，B相并联4.38Mvar的电容，C相并联14.3093Mvar的电容。仿真得出补偿后一次侧三相电流和二次侧电压、电流曲线如图7、图8所示。

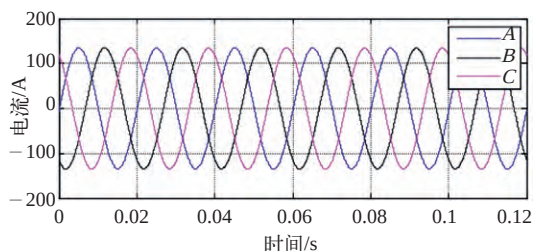


图7 补偿后YNd11变压器一次侧三相电流

可见，补偿装置投入后，一次侧三相电流平衡，负序为零；二次侧各相电压电流同相位，无功得到了完全补偿。进一步证明了方案的正确性。

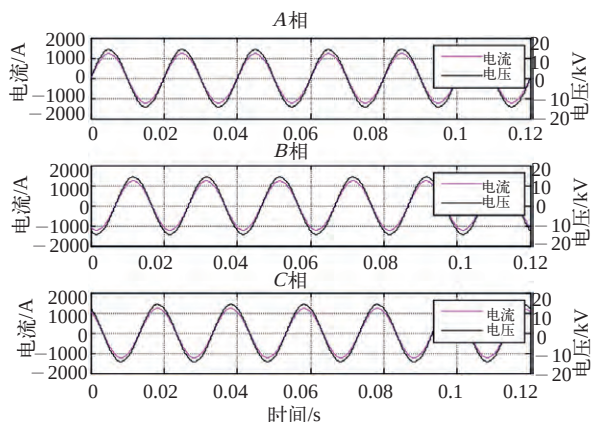


图8 补偿后YNd11变压器二次侧各相电压、电流

结束语

本文分析了基于YNd11变压器的无源补偿方案，建立了端口补偿容量匹配方程，对于各种类型负荷均能实现负序和无功的完备补偿，搭建了基于Matlab/simulink平台的仿真模型，仿真结果验证了方案的正确性。该方案为电力系统负序、无功补偿提供了理论依据。EA

(收稿日期：2015.03.01)

(编辑：白文亭)

(上接第73页)

图5中 t_1 时刻动静触头分离，断路器断口间产生电弧。 t_2 时刻电流停止流过被试断路器，电弧熄灭。电弧熄灭时刻正处于行程曲线斜率增大的起始点，也就是说触头分闸速度加快时刻电弧熄灭。然后通过改变脱扣脉冲的整定方法，进一步缩短燃弧时间，如图6所示。

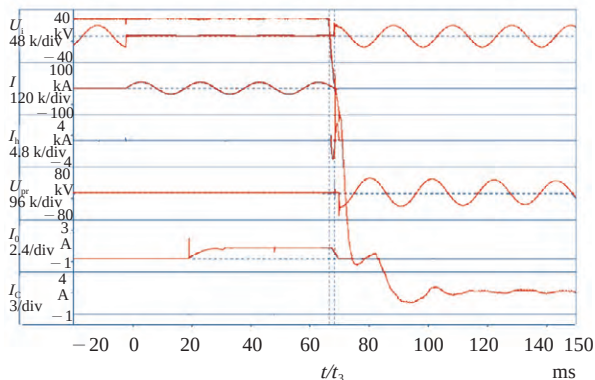


图6 负载试验重燃波形图

图6中 t_1 时刻动静触头分离，断路器断口间产生电弧。 t_3 时刻电流过零，而这时触头分闸速度仍处

于相对较低阶段，电弧重燃，直到下一个高频电流零点，电弧才熄灭，这是因为短路电流过零点和断路器的起弧点，在时间间隔上比较近，触头的运动速度不足以使触头间距离达到最小燃弧距离，无法满足灭弧条件，从而使电弧重燃。由以上重燃试验可知，图5中断路器的燃弧时间即为该断路器的最短燃弧时间。

结束语

由以上分析可知，断路器分合闸速度是决定燃弧时间基础，同时燃弧时间又受断路器合闸同期性、合闸时间、分闸同期性、分闸时间、灭弧介质以及灭弧方式的影响，各种因素相互作用、互相制约、互相影响，它们共同决定了断路器开断短路电流能力，在提高分合闸速度的同时，尽量减少其他因素的对开断性能的不良影响，是断路器结构设计中的应努力的方向。EA

(收稿日期：2015.03.01)

(编辑：白文亭)