

低压配电网三相不平衡节能算法研究

傅军栋, 喻 勇, 刘 晶

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:配电网三相负荷不平衡对供电电网以及变压器等电器都会造成不利的影响,致使低压电网的可靠性和稳定性差,线损增高。结合工程实例,利用遗传算法在Matlab环境下求解出一个最优的负荷分配方案,从而使三相不平衡电路尽量接近三相平衡状态,减小零序电流,减少配网损耗,使系统能够在更加经济的状态下运行,达到节能效果。

关键词:低压配电系统;三相不平衡;遗传算法;节能

中图分类号:TM919

文献标志码:A

低压电网三相不平衡问题一直是基层供电企业棘手的问题,在中低压配电网系统中,存在大量的单相,不对称非线性,冲击性负荷,这些负荷会使中性点电压漂移从而使配电系统产生三相不平衡,低压电网若在三相负荷不平衡度较大情况下运行,将会给低压电网及电气设备造成不良影响。因此会增加线路损耗,降低供电可靠性。

1 三相不平衡的危害和影响

由于线(相)电流的不对称,中性线的电流一般不为零,即 $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \neq 0$,所以对电力系统产生危害是不可避免,图1为简单的三相电路。下面只详细分析低压配电网中三相负载在平衡与不平衡两种情况下所带来的配电变压器绕组损耗和线路损耗。

1) 对变压器的危害。当低压用户端三相负载不平衡运行时会在变压器中造成过大的零序电流,所产生的零序磁通量将会在配电变压器油箱壁及钢构件中穿过,从而造成较大的损耗,增加了变压器的损耗,致使配电变压器运行时产生的温度升高,寿命缩短,严重时甚至烧坏。

配电变压器在三相不平衡运行时,三相绕组的总损耗(单位为W)为

$$P_1 = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)R \quad (1)$$

绕组总损耗(单位为W)在三相平衡时,可以表示为

$$P_2 = 3[(I_A + I_B + I_C)/3]^2 R \quad (2)$$

式中: P_1 , P_2 为平衡与不平衡时三相绕组的总损耗; I_A , I_B , I_C 为三相负荷电流; R 为变压器二次侧绕组电阻。

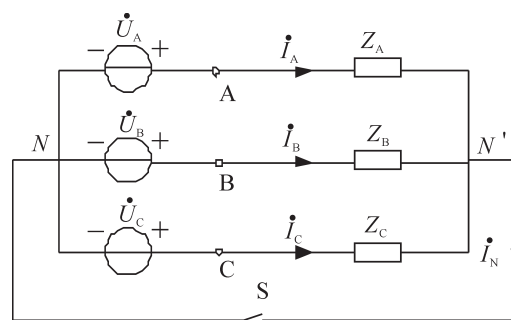


图1 三相电路

Fig. 1 Three-phase circuit

收稿日期: 2013-10-02

作者简介: 傅军栋(1972—),男,副教授,主要从事电力系统,建筑电气及智能化研究。

绕组在三相不平衡运行时的附加损耗(单位为W)表示为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \{[(I_A - I_B)^2 + (I_B - I_C)^2 + (I_A - I_C)^2]/3\}R \quad (3)$$

2) 对线损的影响。低压配电系统多采用Y/Yno三相四线制接线方式供电,由于低压配电网中单相负荷的存在,造成三相不平衡现象是在所难免,不但各相线路上造成的损耗会增加,而且中性线电流也会产生附加损耗,从而使总的线损大大增加。

线路损耗根据图1可以定义为

$$\Delta P_l = I_A^2 R + I_B^2 R + I_C^2 R + I_N^2 R_N \quad (4)$$

式中: ΔP_l 为线路损耗; I_A , I_B , I_C 为三相负荷电流; I_N 为中性线电流; R 为相线电阻; R_N 为中性线电阻。

假定供电线路总负荷电流为 $3I$, 相线及中性线电阻都为 R_0 , 当负载在三相平衡条件下运行时, $I_A = I_B = I_C = I$, $I_N = 0$, 线路功率损耗为 $\Delta P_l = 3I^2 R_0$ 。当负载在三相不平衡条件下运行时, 设A相负载干路电流为 $1.5I$, B相负载干路电流为 $0.5I$, C相负载电流则中线干路电流为 I 。
 $I_N = 1.5I + I \cos 60^\circ - 0.5I \cos 60^\circ = 0.75I$ 。

线路损耗 $\Delta P_l = [(1.5I)^2 + I^2 + (0.5I)^2 + (0.75I)^2]R_0 = 4.0525I^2 R_0$ 。所以配电网中三相负载在不平衡状态下运行时, 线路损耗高出平衡状态下1.35倍, 因此不利于电网的节能运行, 应做出相应调整。

2 模型建立

图2表示一个某小区9个单元楼(B1, ..., B9)刚建成时的布线图, 从图中可以看出, 供电企业将单相负载均衡地分接在A, B, C三相上, B1, B2, B3接在A相上, B4, B5, B6接在B相上, B7, B8, B9接在C相上。在实际工作及运行中, 线路的标志、接电人员的疏忽再加上单相用户的不可控增容、大功率单相负载的接入以及单相负载用电的不同时性, 居民入住率的问题, 都会造成三相负载的不平衡。

2.1 问题分析

为达到优化三相不平衡系统的目的, 必须使 $I_N = I_A + I_B + I_C$ 尽可能的小。由于用户端存在感性和容性负载, 所以要考虑阻抗角 θ 的问题。三相动力负荷平衡不用考虑, 而单相用户存在较大差异, 因此, 只要把配变低压侧的单相负荷统一规划, 均衡地分配到低压线路的三相上, 就能实现三相平衡。

以上述小区为例, 取30 min内各单元支路平均电流大小作为参数来建立模型。支路电流参数见表1所示, 同理取其负荷这段时间平均阻抗角。各单元用户负载阻抗角参数见表2所示。

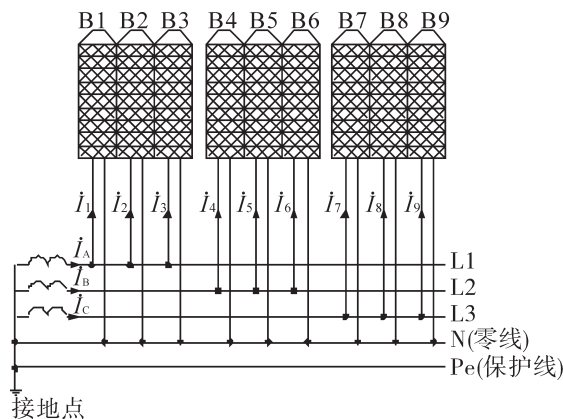


图2 模型图

Fig. 2 Model figure

表1 支路电流参数

Tab.1 Branch current parameters

相线	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9
A相	115	25	35	—	—	—	—	—	—
B相	—	—	—	45	205	105	—	—	—
C相	—	—	—	—	—	—	210	48	95

表2 负载阻抗角参数
Tab. 2 Load impedance angle parameters

相线	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
A相	$\pi/20$	$\pi/40$	$\pi/35$	—	—	—	—	—	—
B相	—	—	—	$\pi/15$	$\pi/12.5$	$\pi/64$	—	—	—
C相	—	—	—	—	—	—	$\pi/32$	$\pi/44$	$\pi/21$

假设 U_{AN} 相位是 0° , U_{BN} 相位是 120° , U_{CN} 相位是 -120° 。在 Matlab 中定义目标函数为

```

{
% I 为各支路的电流; x 为最优解, x 只能取 (0,  $3\pi/2$ ,  $-3\pi/2$ ); g 为阻抗角; N 为所单元楼的数量。
function y=fun(I,x,g,N)
for i=1:N
    S(i)=I(i)*cos(x(i)-g(i));
    T(i)=I(i)*sin(x(i)-g(i));
End
%y1 表示所有实部的和。
%y2 表示所有虚部的和。
y1=sum(S);
y2=sum(T);
%y 为目标函数
y=y1^2+y2^2;
}

根据这个函数, 可以求得没有优化前的中性线电流大小, 程序如下:
{
I=[115 25 35 45 205 105 210 48 95];
N=9;
g=[pi/20 pi/40 pi/35 pi/15 pi/12.5 pi/64 pi/32 pi/44 pi/21];
x=[0 0 0 2.094 4 2.094 4 2.094 4 -2.094 4 -2.094 4 -2.094 4];
y=fun(I,x,g,N)
}

```

运行结果: $y = 2.3802 \times 10^4$; $I_N = \sqrt{y} = 154.25 \text{ A}$, 同理, 可以求得各相总线电流: $I_A = 174.90 \text{ A}$; $I_B = 353.57 \text{ A}$; $I_C = 352.87 \text{ A}$, 优化之前各支路电流柱状图如图3所示。

由图可知优化之前的中性线电流较大, 各相总线电流相差也很大, 离三相平衡状态较远。

2.2 遗传算法实现

1) 初始化: 采取实数进行编码。

2) 解码: 初始化后, 要进行解码操作, 因为系统相电压相差 120° , 分别为 $(0, 3\pi/2, -3\pi/2)$ 。根据随机产生的种群, 按同等的概率划分3个区域。

3) 适应度函数: 适应度是用来判别种群中个体优劣的标准。这里求解函数的最小值, 也就是中性线最小电流, 把最小中性线电流的倒数作为个体的适应度值。优化目标则是选择适应度函数值尽可能大的染色体, 适应度值越大个体越优, 反之亦然。适应度

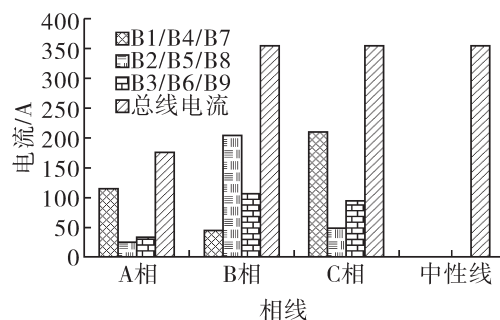


图3 优化之前各支路电流柱状图

Fig. 3 Current histogram of each branch before optimization

计算函数为

$$fitness = 1/f(x) \quad (5)$$

4) 选择:选择是从之前的种群中以一定的概率选择优秀的个体,从而得到一个新的种群。个体适应度值越大,被选中的概率越大。本文采用轮盘赌法,个体 i 被选中的概率为

$$p_i = F_i / \sum_{j=1}^N F_j \quad (6)$$

式中: F_i 为个体 i 的适应度值; N 为种群个体数目。

5) 交叉:交叉是指从种群中随机的选择两个染色体,把父代的优质特性遗传给子代,经过两个染色体的交叉互换后,从而产生新的优质个体。交叉操作采用实数交叉法,第 m 个染色体 a_m 和 n 个染色体 a_n 在 j 位的交叉操作方法为

$$a_{mj} = a_{mj}(1-b) + a_{nj}b; a_{nj} = a_{nj}(1-b) + a_{mj}b \quad (7)$$

式中: b 是 $[0,1]$ 区间的随机数。

6) 变异:变异的主要目的是保持种群多样性。变异操作是从种群中随机选取一个染色体,选择染色体中的某一位置进行变异以产生更加优质的染色体。第 i 个染色体的第 j 个基因 a_{ij} 进行变异的操作方法为

$$a_{ij} = \begin{cases} a_{ij} + (a_{ij} - a_{\max})f(g), & r \geq 0.5 \\ a_{ij} + (a_{\min} - a_{ij})f(g), & r < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $a_{\max}$ 是基因 a_{ij} 的上界; $a_{\min}$ 是基因 a_{ij} 的下界; $f(g) = r_2(1 - g/G_{\max})^2$; r_2 是一个随机数; g 是当前迭代次数; $G_{\max}$ 是最大进化次数; r 为 $[0,1]$ 区间的随机数。

3 仿真及结果

根据以上的遗传算法思路,在Matlab2009环境编写程序,所编写程序是针对 N 个支路,假定 $N=9$ 。

输入支路数 $N=9$;输入各支路电流大小 $I=[115 \ 25 \ 35 \ 45 \ 205 \ 105 \ 210 \ 48 \ 95]$;输入各支路负载的功率因素 $g=[p_1/20 \ p_2/40 \ p_3/35 \ p_4/15 \ p_5/12.5 \ p_6/64 \ p_7/32 \ p_8/44 \ p_9/21]$ 。仿真结果如图4所示。

从图中可以看出,在第15代达到了最优值。

函数值:84.990 9;

变量:2.094 4, 2.094 4, 0, 2.094 4, -2.094 4, -2.094 4, 0, 0, 2.094 4;

$y=84.990 \ 9$ 表示最优解;0, 2.094 4, -2.094 4分别表示0, $3\pi/2$, $-3\pi/2$ 。

对比之前的 $I_N = \sqrt{y} = 154.25 \text{ A}$,中性线电流比优化之前小近17倍。

变量信息说明优化之后B3, B7, B8三个单元应接在A相;B1, B2, B4, B9四个单元应接在B相;B5, B6两个单元应接在C相。优化之后 $I_A = 292.99 \text{ A}$; $I_B = 279.86 \text{ A}$; $I_C = 308.58 \text{ A}$; $I_N = \sqrt{y} = 9.22 \text{ A}$ 。

优化前后数据统计表见表3,优化前后各相电流对比图如图5所示。

从图中可以很清晰的看出,优化之后中性线电流从原来的154.249 A减小为9.22 A。而且各相电流也比较平均,都分布在300 A左右。三相负荷电流不平衡度公式为

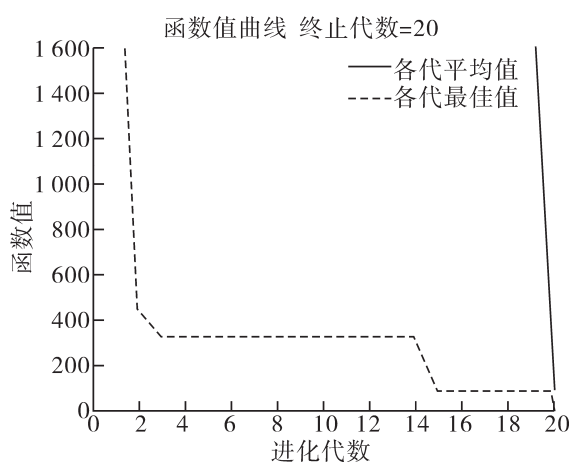


图4 Matlab仿真结果

Fig. 4 Matlab simulation results

$$\delta = \frac{I_{\max} - I_{\text{av}}}{I_{\text{av}}} \times 100 \quad (9)$$

式中: $I_{\max}$ 为最大一相负荷电流; I_{av} 为三相负荷电流的平均值; δ 为三相负荷电流不平衡系数。

表3 优化前后数据统计表

Tab. 3 Data before and after optimization

参数	A相	B相	C相
优化前	174.90	353.57	352.87
优化后	292.99	279.86	308.58

根据图5得: $\delta_{\text{前}} = 20.35\%$; $\delta_{\text{后}} = 5.03\%$ 。系统运行在三相完全平衡状态是不可能的,但是电力部门应该尽可能地降低三相不平衡度。

下面讨论视在功率,视在功率 S 可定义:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

式中: P 为系统的有功功率; Q 为系统的无功功率。

因为三相线路阻抗远小于用户阻抗,可忽略其影响,中性线阻抗采取定性分析,设中性线阻抗为 $Z_0 = R_0 + jX_0$ 。

优化之前

$$S_{\text{前}} = \sqrt{(191\,757 + 23\,793R_0)^2 + (27\,884.2 + 23\,793X_0)^2} \text{ V} \cdot \text{A}$$

优化之后

$$S_{\text{后}} = \sqrt{(191\,757 + 85R_0)^2 + (27\,884.2 + 85X_0)^2} \text{ V} \cdot \text{A}$$

可以看出优化前后视在功率相差非常大,主要影响来自中性线上的电流。由以上结果可知,系统已经得到了很大的改善,调整之后系统很明显能够在更加经济的状态下运行,能够带来非常大的经济价值。

4 结束语

根据以上分析,三相不平衡运行的电力系统通过采用遗传算法,可以得到一个最优的负荷分配方案。在实际生活中,可结合智能自动配电箱对各支路进行自动切换。如不采用智能配电箱,实际应用中不可能每30 min人工改造一次线路,但可通过算法统计单位时间内被选择过的所有分配方案出现的概率,作为线路节能改造的有效参考,对系统有针对性地调整,从而达到节能的目标。

参考文献:

- [1] 沈铁军. 低压电网三相不平衡问题的几点探讨[J]. 民营科技, 2011(8): 144-144.
- [2] 曹法明. 低压三相平衡与降损[J]. 电气工程应用, 2010(4): 17-19.
- [3] 刘福之. 三相交流电路中瞬时功率的分析和研究[J]. 华东交通大学学报, 2003, 19(5): 56-80.
- [4] 谷雅玮, 王默玉, 申晓留, 等. 基于 Matlab 的农网线损理论计算[J]. 黑龙江电力, 2011(5): 325-327.
- [5] 梁海瑞. 三相负荷不平衡对线损的影响及措施研究[J]. 电源技术应用, 2013(1): 15-15.
- [6] 赵吴鹏, 尹忠东, 周浩, 等. 基于低压配电网无功负荷不平衡现象的节能降损解决方案[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 15-19.
- [7] 黄琰, 陈恩. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2006, 19(1): 107-110.
- [8] 赵吴鹏, 周浩, 张瑜. 三相不平衡低压系统负序线损及治理方案分析[J]. 河北电力技术, 2010, 29(2): 22-27.

(下转第136页)

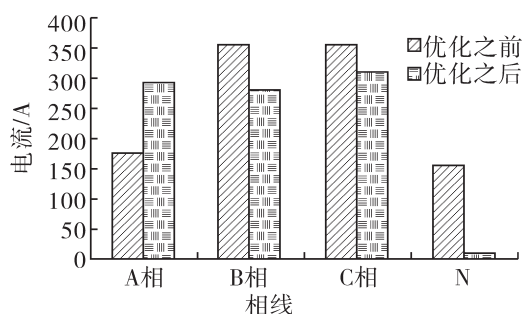


图5 优化前后各相电流对比图

Fig. 5 Current of each phase before and after optimization

An Empirical Research on the Relationship Between Monetary Structure and Price Fluctuation in China

Shi Huanping¹, Gao Yan^{1,2}

(1.School of Economics and Management, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2.Jiangxi Vocational College of Mechanical & Electrical Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, the quantitative analysis about whether there are common trends or wave patterns between China's monetary structure factors and price fluctuation is conducted. The long-term relationship between them is estimated by co-integration regression test. The VAR model between variables is established to study the dynamic process of the impact of monetary structure on pricing. The impulse response analysis is carried out to explore the response status of the price fluctuation under the impact of monetary structure variables.

Key words: monetary structure; price fluctuation; VAR; impulse response

(上接第 114 页)

- [9] 张雪.三相平衡的必要性及降损方法[J].化学工程与装备,2008(12):58-60.
- [10] 章勇高,高彦丽,刘映,等.三相不平衡时的PWM整流器锁相环设计[J].华东交通大学学报,2011,28(5):14-17.
- [11] 张五一,张言滨,刘华伟.配电网三相负荷不对称的线损分析[J].继电器,2007,35(7):24-27.
- [12] 陈诚,王勋,程宏波.三相PWM整流系统的研究[J].华东交通大学学报,2012,29(6):40-44.
- [13] 李超英,李宝贤,王瑞琪.配电变压器三相不平衡技术分析与管理措施研究[J].价值工程,2011(14):47-48.

Energy-efficient Algorithm for Three-phase Imbalance in Low-voltage Distribution Network

Fu Jundong, Yu Yong, Liu Jing

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The unbalanced three-phase load has negative effects on the power supply and the electrical appliances like transformers, resulting in poor low-voltage grid reliability and stability with higher line loss. Combined with engineering examples, this paper adopts the use of genetic algorithm in Matlab environment, establishing an optimal load distribution scheme to keep the three-phase unbalanced circuit close to the three-phase equilibrium state. It finds out that the system can be more economical in running state as the zero-sequence current decreases and distribution network losses are reduced.

Key words: low-voltage distribution systems; three-phase imbalance; genetic algorithm; energy-efficient