

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.021

10 kV 配电网串联补偿电容内部故障的诊断方法

陈 璞¹, 任 勇¹, 陈 可², 江道灼^{2*}, 陈 峰², 毕仁明³

(1. 南网贵州供电公司, 贵州 贵阳市 550001; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 浙江桂容谐平科技有限责任公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 针对配网固定串联补偿电容内部故障问题, 先简单分析了固定串联电容器(D-FSC)在辐射状配电线路中改善电压特性的基本原理, 并介绍了串补装置结构图以及对配网固定串联电容器中电容器内部结构及系统接线进行了数学建模。在补偿电容器出现内部故障时, 给出一种内部故障诊断的判据, 同时提出在系统谐波影响下判据的改进方法, 并通过 Matlab/Simulink 仿真和实验对新型判据进行验证。研究表明, 所提出的判据能有效地对谐波影响下的系统进行故障诊断, 效果优于常规方法。

关键词: 配网固定串联电容器; 系统谐波; 数学建模; 新型判据

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)07-0987-05

Diagnostic of D-FSC capacitor internal fault for 10 kV distribution network

CHEN Pu¹, REN Yong¹, CHEN Ke², JIANG Dao-zhuo², CHEN Feng², BI Ren-ming³

(1. Guiyang Power Supply Bureau, Guiyang 550001, China;

2. College of Electrical Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Zhejiang GuirongXieping Technology Co., Ltd. Hangzhou 310030, China)

Abstract: Aiming at the problem of internal fault of D-FSC capacitor, the basic principle of distribution-fixed series capacitor(D-FSC) improving the voltage profile of radial distribution line was simply analyzed, as well the structure chart of it was introduced and the mathematical models of D-FSC internal structure and system wiring were established. Therefore a diagnostic criterion of capacitor internal fault was given when internal fault occurs, as well an improved method was put forward to deal with the system harmonic. Finally, the criterion was verified by Matlab/Simulink and experiment. The research results indicate that the criterion proposed performed effectively in internal fault diagnosis with the system harmonic, and is better than conventional method.

Key words: distribution-fixed series capacitor (D-FSC); system harmonic; mathematical modeling; new criterion

0 引 言

电压质量一直是衡量供电质量是否符合标准的一项重要指标。而我国配电网建设相对滞后, 局部地区存在网架薄弱、设施老化、线径小、配电变压器数量多问题^[1], 尤其是较多线路带有多台大容量的电动机或变化迅速的工业负荷, 往往导致线路末端电压低、电压跌落严重的问题。

一般采用随用电器的分散式并联无功补偿的方法解决上述问题^[2]。但该方法存在一条配电线路上的安装数量多、维护量大、开关动作频繁、噪声大、响应速度慢的弊端, 并且会造成重载时电压低、轻载时电压高。

串联补偿装置的结构和控制相对简单, 既可以起到提高稳定极限, 增强输送能力, 和调节潮流分配等作用, 并具有负荷“自适应”电压调节和实时响应的特点^[3-6], 相比之下有更好的经济性和发展前景。

收稿日期: 2014-12-30

作者简介: 陈 璞(1973-), 男, 贵州贵阳人, 工程师, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。E-mail: 32488312@qq.com

通信联系人: 江道灼, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: dzjiang@zju.edu.cn

固定串联电容器(D-FSC)是最常见的串联补偿装置,但是 D-FSC 一旦出现电容元件的老化,不仅会造成高压电容器损坏,甚至可能出现鼓肚、群爆等严重的设备事故,给电网安全运行造成影响^[7]。

目前电力电容器装置一般采用文献[8]提出的电流(或电压)差动保护等常规安全运行保护措施,需要额外配置电压电流的检测设备,增加了设备成本。文献[9-11]提出的基于电容值的故障诊断判据,通过检测电容器两侧的电压和电流,直接计算电容值来判断其损坏情况,此判据未考虑系统含有谐波的情况,导致在系统含有谐波时精度不高,甚至出现误判。

本研究首先分析 D-FSC 在辐射状线路中改善电压特性的基本原理,并通过对电力电容器及其所在系统的建模,提出一种判断电容器内部故障的判据方法,考虑系统存在谐波的情况,最后通过仿真验证判据的有效性和可行性。

1 D-FSC 基本原理

辐射状线路中感性负荷用电向量图如图 1 所示。线路中当加入串联电容器 X_C 时,如图 1 所示。

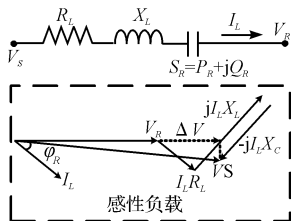


图 1 加入 D-FSC 时的向量图

V_S, V_R —辐射状线路的首端和末端电压; I_L —线路电流;
 R_L, X_L —线路的电阻和电抗; S_R, P_R, Q_R —末端三相视载、有功和无功功率; φ_R —末端的功率因数角

此时,由图 1 中的向量图可得,线路首末端线电压之差(一般只考虑纵分量):

$$\Delta V = \sqrt{3}(I_L R_L \cos\varphi + I_L (X_L - X_C) \sin\varphi) = \frac{P_L R_L + jQ_L (X_L - X_C)}{V_R} \quad (1)$$

由式(2)可知,D-FSC 在线路中相当于一个电压调节器。它总能产生一个与线路电抗压电压相反的电电压,其值为:

$$\Delta V_C = \sqrt{3}I_L \cdot X_C \cdot \sin\varphi \quad (2)$$

该串联电容器提供的无功补偿容量为:

$$Q_C = 3(I_L \cdot \sin\varphi)^2 X_C \quad (3)$$

由式(3,4)可知,D-FSC 补偿的电压与线路电流成正比,容量与电流的平方成正比。

当串补装置下游负荷越重,即造成线路首末端电

压差越大时,串补补偿的电压也就越大,而当负荷较轻或空载时,线路电流很小,其补偿的电压也随之减小,这是 D-FSC 能够“自适应”电压调节的基本原理,也是串补最大的特点和优势。

2 D-FSC 结构及补偿电容内部结构

D-FSC 装置串于配电线路中两个分接点(配变支路与主线的连接点)之间,结构如图 2 所示。

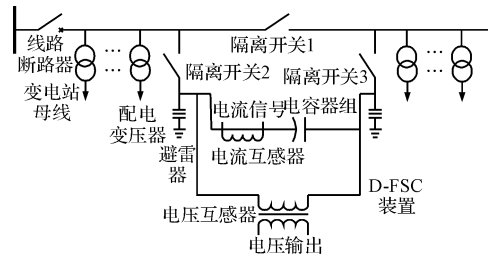


图 2 固定串联补偿装置的结构图

串联补偿电容结构如图 3 所示。电容器中电容由多个内部小电容和内部电阻的并联,其中每个小电容都串联一根内熔丝,一旦内部小电容发生故障时,与其串联的内熔丝迅速熔断,从而隔离故障元件,而其余小电容则可以继续运行。

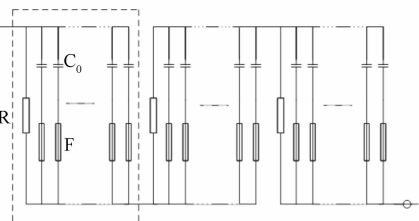


图 3 电容器内部结构

3 电容器故障建模分析

3.1 电力电容器建模

大容量电力电容器一般由数十个甚至上百个小电容串并联构成。以常用型号 BAM11/√3-334-1W 电容器为例,由 36 个电容元件 12 并 3 串构成,结构图如图 2 所示。并联的电阻很大,电容器的有功损耗很小,其电阻值可以忽略。电容器容值为 $4C_0 = 26.3592 \mu\text{F}$ 。对其进行简化后的内部结构如图 3 所示。则一个电容器的电容值 C 可以通过下式计算:

$$C = \frac{I}{\omega U} \quad (4)$$

式中: I —流过电容器的电流有效值, U —电容器电压有效值, ω —角频率。

若内部小电容发生不同损坏,其电容值可以通过如下计算:

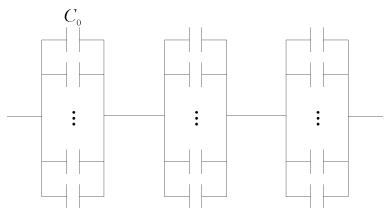


图4 简化后的电容器内部结构图

$$C = \frac{1}{\frac{1}{xC_0} + \frac{1}{yC_0} + \frac{1}{zC_0}} = \frac{xyzC_0}{xy + yz + xz} \quad (5)$$

式中： C_0 —内部单个小电容容值； x, y, z —电容器3个并联组中对应正常工作的小电容个数。

因此，电容器容值的相对变化百分比可以表示为：

$$\frac{\Delta C}{C} = \left| \frac{C - 4C_0}{4C_0} \right| = 1 - \frac{1}{4(1/x + 1/y + 1/z)} \quad (6)$$

例如，当一个电容器发生两只小电容损坏时，有以下共2种情况：

(1) 两只小电容分别损坏在2个并联组中，即 x, y, z 中其中一个为12，其余两个是11，例如 $(x, y, z) = (11, 11, 12)$ ，则：

$$\frac{\Delta C}{C} = 1 - \frac{1}{4\left(\frac{1}{11} + \frac{1}{11} + \frac{1}{12}\right)} = 5.7143\% \quad (7)$$

(2) 两只小电容损坏在同一个并联组中，即 x, y, z 中其中一个为10，其他两个是12，例如 $(x, y, z) = (10, 12, 12)$ ，则：

$$\frac{\Delta C}{C} = 1 - \frac{1}{4\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{12} + \frac{1}{12}\right)} = 6.2500\% \quad (8)$$

因此，当发生两只内部小电容损坏时，电容器容值变化百分比通过两者取平均可以近似为5.9822%。同理可以分别求出损坏0、1、3个小电容时的电容器值相对变化百分比，具体如表1所示。

表1 电容器内部故障时容值变化百分比

损坏个数	$(\Delta C/C)/(\%)$
0	0
1	2.9412
2	5.9822
3	9.0577

本研究通过监测电容器电流电压，利用式(5)求得电容器实时电容值，再根据式(6)和式(7)，计算电容器容值变化率，从而诊断电容器故障。由于表1是理想情况下所得到的容值百分比，实际情况下由于误差的存在，取一定范围进行判断，判据表如表2所示。

3.2 提高精度的改进判据

一般情况下，系统中常常存在谐波，采用式(5)计

表2 判据表

损坏小电容个数	$\Delta C/C(\%)$
0	(0, 1.4706)
1	(1.4706, 4.4617)
2	(4.4617, 7.5200)
≥ 3	(7.5200, $+\infty$)

算容值忽略了系统谐波的情况，可能出现误诊断，如：

电容器完好无损，容值 $4C_0$ 为 $26.3592 \mu\text{F}$ 。电容器上通过的基波电压有效值为1kV，假设系统中存在谐波且3、5、7、11次谐波幅值分别为10%、5%、3%和2%。通过检测电容电压有效值 U 和电容电流有效值 I ，经过式(5)计算容值 C 为 $29.266 \mu\text{F}$ ，电容器容值的相对变化百分比为9.932%，判断损坏3个电容，出现误诊断。操作人员根据原有判据切断 D-FSC，就会造成时间、资源上不必要的浪费。

因此，在考虑谐波特性的情况下，对检测到的电压和电流进行FFT展开提取电压和电流的基波和各次谐波分别为 $U_{(1)}, U_{(3)}, U_{(5)}, \dots, I_{(1)}, I_{(3)}, I_{(5)}, \dots$ 。因此各次谐波下电容器的容值 $C_{(i)}$ 为：

$$C_{(i)} = \frac{I_{(i)}}{i\omega U_{(i)}} \quad (9)$$

式中： i —谐波次数。

理论上，基波和各次谐波下计算得到的电容器容值相同，但是在实际中存在差别，因此电容器容值的估算值根据基波和各次谐波在电路中所含的比例可以通过式(10)进行估算：

$$C_{\text{detect}} = \frac{\sum_i I_{(i)} C_{(i)}}{\sum_i I_{(i)}} \quad (10)$$

得到电容器的估算之后，得到下式：

$$\Delta C = \frac{C_{\text{detect}} - C}{C} \quad (11)$$

根据式(10~11)的值修正容值变化百分比，然后根据表2进行故障判断。

4 仿真分析

从电容器的模型构建中可以发现，常规判据和改进判据在无谐波影响情况下得出的结果一致(改进判据在无谐波影响下相当于只有基波分量)，但是在系统存在谐波时会得到不同结果，下面将从仿真中验证新型判据。

4.1 内部故障仿真

当系统存在谐波，电容器组没有损坏时，电容上电压电流谐波含量如图5、图6所示。

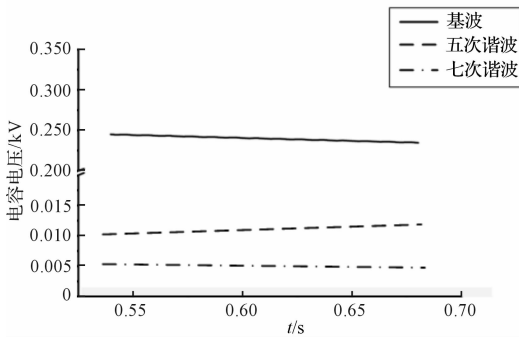


图 5 无电容损坏时的电容电压

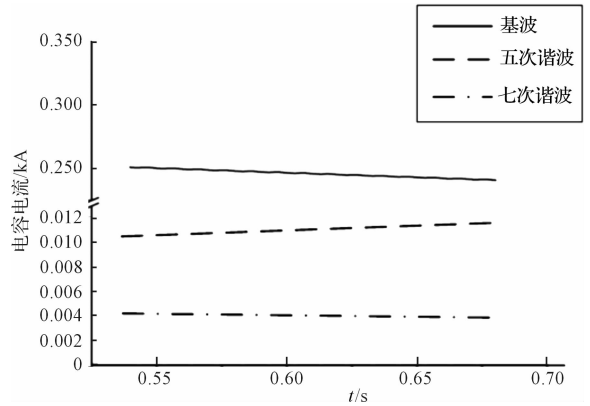


图 8 电容损坏时的电容电压

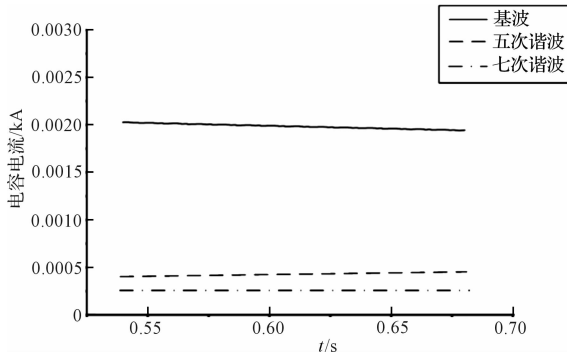


图 6 无电容损坏时的电容电流

其基波电压有效值 $U_{(1)}$ 为 240.667 V, 基波电流有效值 $I_{(1)}$ 为 1.991 2 A, 五次谐波 $U_{(5)}$ 为 10.329 V, $I_{(5)}$ 为 0.438 1 A, 七次谐波 $U_{(7)}$ 为 4.616 V, $I_{(7)}$ 为 0.255 1 A, 用常规判据得到电容 C 为 27.146 9 μF , 容值变化百分比 2.902%, 改进判据容值 C 为 26.380 2 μF , 容值变化百分比 0.08%。根据判据表, 在常规判据下, 因为谐波影响判断有 1 个电容发生损坏, 跟实际情况相违。而改进判据不会受其影响。

当两只小电容损坏在同一个并联组中, 其他电容没有损坏时, 电容上电压电流谐波含量如图 7、图 8 所示。

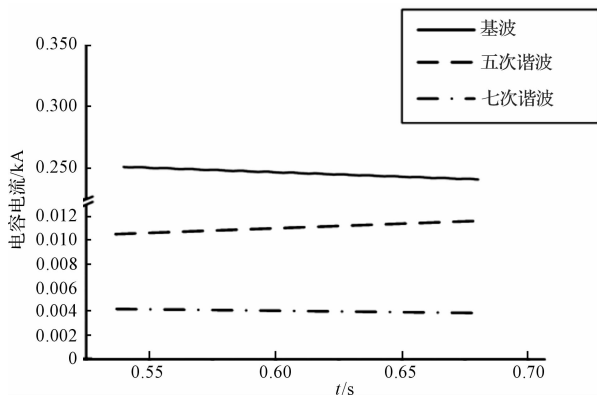


图 7 电容损坏时的电容电压

其基波电压有效值 $U_{(1)}$ 为 246.724 V, 基波电流有效值 $I_{(1)}$ 为 1.915 A, 五次谐波 $U_{(5)}$ 为 11.030 V, $I_{(5)}$ 为 0.438 A, 七次谐波 $U_{(7)}$ 为 4.065 V, $I_{(7)}$ 为 0.226 A, 用常规判据得到电容 C 为 25.487 μF , 容值变化百分比 3.421%, 判断仅 1 个电容发生故障, 再次出现误判断。改进判据容值 C 为 24.855 μF , 容值变化百分比 6.052%, 2 个电容发生故障。

4.2 改进判据对比

当实际情况中电容器组小电容发生不同个数损坏时, 得到两种判据结果对比如表 3 所示。

表 3 判据对比

方法	实际损坏情况	$(\Delta C/C)/(\%)$	判断故障电容个数
常规判据	0	2.902	1
	1	0.073	0
	2	3.421	1
	3	7.697	3
改进判据	0	0.080	0
	1	2.436	1
	2	6.052	2
	3	10.458	3

表 3 中, 损坏情况均发生在单个并联组中。从表 3 可以看到改进判据较理想, 常规判据在没有电容损坏时误判断有内部故障发生, 而当有故障发生时又误判断 D-FSC 内部电容全部正常, 对系统中存在谐波情况下失去了准确性。改进判据则解决了这样的问题, 在系统有无谐波时都能很准确地判断故障是否发生, 以及电容损坏的个数。

(下转第 999 页)

本文引用格式:

陈 璞, 任 勇, 陈 可, 等. 10 kV 配电网串联补偿电容内部故障的诊断方法[J]. 机电工程, 2015, 32(7): 987-990, 999.

CHEN Pu, REN Yong, CHEN Ke, et al. Diagnostic of D-FSC capacitor internal fault for 10 kV distribution network[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(7): 987-990, 999.