

基于不平衡电流变化量的电容器组预警方法实现及应用

根据双星形电容器组元件损坏的理论特征分析,提出了不平衡电流变化量法。该方法通过检测双星形电容器组两臂之间的电流,再结合三相电流,计算出不平衡电流变化量,并通过矢量比较,判断是否发生了故障。通过系统仿真的各种数据也验证了新的预警方法,并设计了专用的电容器组预警装置,在现场投入了应用。

陈晓宇^{1,2} 郑建勇¹ 梅 军¹/1.东南大学电气工程学院 2.江苏金智科技股份有限公司

0 引言

随着电网中电压及无功的调节越来越频繁,电容器组的内部元件损坏故障经常发生。当其中单个电容元件损坏时,其他电容元件因过电流或过电压更容易损坏,所以经常由轻微故障发展成严重故障,扩大了事故的范围及影响^[1-3]。

当前,电容器组的可靠性是通过定检试验来保证的。缺点:试验需要停电进行,会给生产带来一定的影响;即使设备状态良好,也需按计划进行试验,造成浪费和损坏风险;停电后设备状态与运行中状态不一致,从而影响了分析判断的准确性;试验周期一般较长,仍可能在两次试验间隔期内发生内部故障。

由此可见,现有的定检措施对于电容器的安全运行存在一些盲区。因为电容器组由内部故障发展为严重故障通常都有一定的发展期(通常有几个月时间),因此如果电容器配置了在线监测及预警装置,做到实时监视,一旦发生内部轻微故障时能及时发现并报警,提醒运行维护人员在发展期内处理,将大大提高电容器的运行可靠性。

关键词/Keywords

电容器预警.
不平衡电流变化量.
故障仿真.
在线监测装置.

1 双星形电容器组内部故障时的特征分析

双星形电容器组的接线图如图1所示,其中性点不平衡电流 I_{ou} 是检测连接在两个中性点之间的电流互感器二次侧电流,该电流大小决定于同相两臂之间的电容偏差与相间电容偏差。

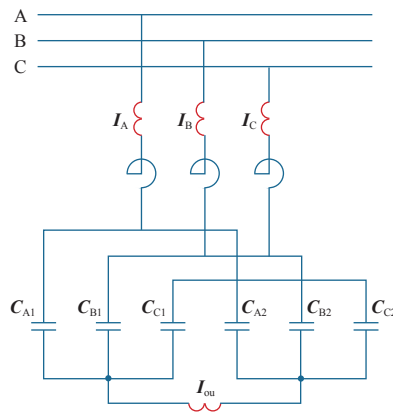


图1 电容器接线图

1.1 双星形接线内熔丝结构电容器组

假设每臂有 N 个电容器单元串联段,臂1每串联段有 M_1 台电容器单元并联组成,臂2每串联段有 M_2 台电容器单元并联组成。目前使用的电容器单元通常都采用先并联后串联的元件结构,假设单台电容器内部元件间的接线方式为 n 串联 m 并联。

当A相臂1电容器组中,一台电容器单元内部某一串联段有 k 个元件因发生击穿而被内熔丝动作切除,故障元件被隔离,假设并联电容器组中性线电流为 I_{ou} ,则根据电路原理,对双星形不接地电容器组有^[4-5]

$$I_{ou} = \frac{(M_1 M_2)}{(M_1 + M_2)} \cdot \frac{3kM_1 M_2}{3N(M_1 + M_2)[nM_1(m-k) + k(M_1 - 1)] + k(2M_1 + 3M_2)} I_B \quad (1)$$

1.2 双星形接线外熔丝结构电容器组

假设每臂有 N 个电容器单元串联段，臂1每串联段有 M_1 台电容器单元并联组成，臂2每串联段有 M_2 台电容器单元并联组成。其中单台电容器内部元件间的接线方式为 n 串联 m 并联，当一台电容器单元内部某一串联段有 k 个元件（ k 个元件为串联关系）发生击穿，则根据电路原理，对双星形不接地电容器组有

$$I_{ou} = \frac{(M_1 M_2)}{(M_1 + M_2)} \cdot \frac{3kM_1 M_2}{3(M_1 + M_2)[M_1 N(n-k) + k(N-1)] + kM_1} I_B \quad (2)$$

2 不平衡电流变化量法

2.1 理论分析

当前针对电容器在线监测，虽然很多方法理论上可以反映电容器组的内部故障，但是在实施时会受现场实际条件和电网运行情况的影响，难以实现预计功能^[6-11]。

由之前的故障特征分析可知，当电容器组发生内部故障时，其中性点电压将发生偏移，三相电流与不平衡电流将发生变化。因此提出采用不平衡电流的矢量相对位移法，通过不平衡电流相对位移的大小判断出是否发生了内部故障。此方法通过不平衡电流和三相电流值即可敏感地判断出电容器组的内部电容元件是否发生故障，且对现场TV与TA的准确度要求不高，同时能躲过系统的电压波动。

2.2 实现方法

首先默认当装置刚刚投入运行时电容器处于正常运行状态。因为通常10 kV和35 kV系统采用不接地系统或者不直接接地系统，对于双星形接线的电容器组，理论上应满足

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (3)$$

$$I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} = I_{ou} \quad (4)$$

式中， I_A 、 I_B 和 I_C 为电流互感器测得的三相电流； I_{ou} 为不平衡电流互感器测得的电流； I_{A1} 、 I_{B1} 和 I_{C1} 为臂1上流过的三相电流。实际每臂上并无电流互感器。考虑到多个环节的测量误差，当电容器在完好状态时，也无法估算出不平衡电流 I_{ou} 的初始值。假设装置此时测得的三相电流和不平衡电流，列出以下公式

$$I_A h_A + I_B h_B + I_C h_C = I_{ou} \quad (5)$$

根据式（3）带入后得到

$$I_A h_A + I_B h_B + (-I_A - I_B) h_C = I_{ou} \quad (6)$$

式中， I_A 、 I_B 和 I_{ou} 均为矢量，因此式（4）可以分解为实部虚部两个方程，即

$$\begin{cases} I_{Ai}(h_A - h_C) + I_{Bi}(h_B - h_C) = I_{oui} \\ I_{Ar}(h_A - h_C) + I_{Br}(h_B - h_C) = I_{our} \end{cases} \quad (7)$$

式中，下标 i 为该矢量的虚部；下标 r 为该矢量的实部。经解方程计算后，计算出 $(h_A - h_C)$ 和 $(h_B - h_C)$ 的值。

令不平衡变化量参考值 I_{bhl} 为

$$I_{bhl} = I_A h_A + I_B h_B + I_C h_C - I_{ou} \quad (8)$$

将式（3）带入后得到

$$I_{bhl} = I_A(h_A - h_C) + I_B(h_B - h_C) - I_{ou} \quad (9)$$

由 I_{bhl} 的计算公式可知，其初始值为0。只要三相阻抗不发生变化，系统电压发生的三相电压波动不会影响到该值。当某相电容器的内部元件发生故障，导致该相的阻抗发生变化时，式（5）等号的左侧和右侧不再成立，从而才会产生变化量，如图2所示。结合电流变化量的判据式（1）和式（2），即可清晰地判断出故障元件个数。再根据之前故障特征分析中故障相和非故障相电流的变化特点，即可判断出故障相别。

此方法只用到了三相电流与不平衡电流，对初始的外部TA误差采用了初始量归零法，准确

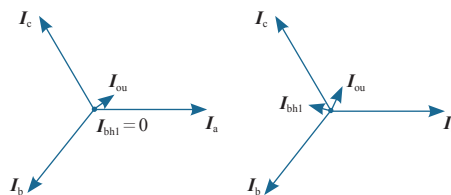


图2 不平衡电流变化量

度较高。且采用三相电流，能躲过系统的电压波动。通过延时的整定值，可以与电容器的继电保护功能相配合^[12-13]。

3 不平衡电流变化量法仿真及预警装置设计

首先根据现场某台电容器的参数建立电容器的基本模型，则仿真结果如下表所示。

表 变化量仿真

(单位: A)

相别	初始态	A相故障 $k=1$	A相故障 $k=2$	A相故障 $k=3$
I_{ou}	0.707	0.310	0.954	3.795
I_{bhl}	0.001	0.471	1.414	4.419
I_A	5.304	5.422	5.540	6.011
I_B	5.245	5.304	5.422	5.599
I_C	5.186	5.245	5.304	5.481

由上表的仿真数据可见，总体上 I_{ou} 能反映电容器的内部元件损坏。但当 k 较小时，因为受到 I_{ou}

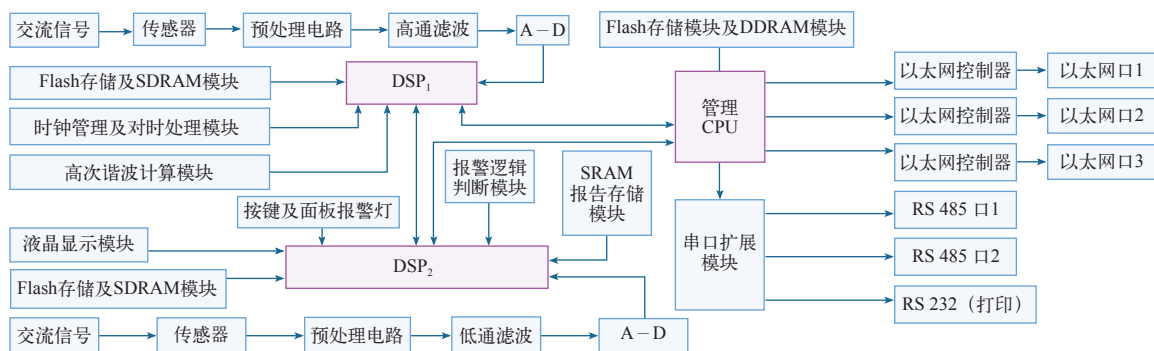


图3 装置硬件框图

采用独立双DSP，经独立双通道采集，每个通道经过不同的隔离互感器、采集电路并经不同的算法，分别实现基于电压电流通道的各次谐波监测和基于电压电流通道基波的损耗角正切值计算。一组电流电压，经过稳态高准确度的互感器，经过滤波电路，A-D采样电路，由DSP采样计算得到准确的电压电流基波值，用于不平衡电流和电压的计算。另外一组电流电压，经过高准确度互感器、谐波放大电路和A-D采样电路，由DSP采样计算得到准确的谐波电流电压。

两个高速DSP（DSP₁和DSP₂）以及相应的完全独立的16位A-D转换器、存储器以及I/O扩展电路，分别用于装置的各种计算功能，两部分电路完全

初值的影响，无法根据 I_{ou} 判断是否有元件损坏。但 I_{bhl} 的初始值归零，当元件损坏时，其变化量与式（1）或式（2）的理论值非常接近。因此仿真数据验证了不平衡电流变化量法能有效判断出是否发生故障，且判断出故障元件个数。

4 装置设计

除了以上不平衡电流变化量判据，装置还有其他几个主要判据：2~25次谐波越限，中性点电压变化量，相电流差值变化量，过电压、低电压，介质损耗计算等。

根据这些判据的需求，装置需同时具备较高准确度的基波采样值和各次谐波采样值，因此设计独立双通道，双DSP的硬件结构。

装置的模块设计如图3所示，按照CPU的分布来看，主要由DSP₁、DSP₂及管理CPU共3个大模块组成。

冗余配置，确保装置的可靠性。其中DSP₁部分包含交流量的采集、预处理模块、高通滤波模块、A-D采样模块、高次谐波计算、时间管理及定时功能以及Flash和SDRAM的处理模块；DSP₂部分包含交流量的采集、预处理模块、低通滤波模块、A-D采样模块、基波各数据计算、告警判断、Flash和SDRAM的处理模块、掉电保持SRAM报告及录波保存模块以及液晶显示模块和按键指示灯模块。

管理CPU完成与监控计算机或RTU的连接，设置了3个用于向监控计算机或RTU传送报告的100 MB以太网接口，可以选择双绞线方式或光纤方式。另外还配置有2个RS 485接口和1个RS 232打印接口用于连接打印机。时钟同步端口用于装

置的硬对时,其电平接口符合RS 422/485标准,该接口接收GPS对时装置发送的秒脉冲信号或IRIG-B对时信号。

5 现场应用

5.1 现场应用

为了对此预警方法与监测装置进行验证,在某地区的几个变电站,安装了电容器监测及预警装置。

装置中接入了三相电流,三相电压以及不平衡电流。默认安装时的状态为初始状态,在装置中的界面“初始值归零”后,装置中的 $I_{bh1}=0$ 。装置中的报警定值为根据电容器组的参数自动计算。

装置具备远程以太网通信功能,可在装置内直接设置网关,通过电力系统的内网连接到主站。采用104规约通信,在主站可以直接查看各装置的报警信息,当有报警时即可知道哪个变电站内的哪个电容器发生了内部元件损坏。

5.2 对于后续推广的思考

为了使得该功能得到推广又不增加使用成本,可以考虑将该预警模块加入到电容器组的保护测控装置中。电容器组必须配置保护测控装置,而该保护测控装置通常都会接入三相电流,三相电压以及不平衡电流,因此如果将电容器组的保护测控装置中增加该功能,既可以实现保护测控功能,也能实现预警功能。

6 结束语

通过以上理论分析、仿真与实现,可以看出当电容器组内部元件发生故障时,可以及时预警。所提出的基于不平衡电流变化量法能够准确地反映电容器早期内部故障,且该方法不易受现场各种情况和误差影响,当单台电容器一个元件发生故障时,可以及时预警。电容器故障预警装置的推广使用,将为电容器故障处理赢得时间,避免电容器故障的扩大,有利于提高电网的运行管理水平。

参考文献

[1] 刘艳,刘瑞云,陶维亮,等.电力电容器故障检

测系统的设计与实现[J].电气应用,2011,30(12):78-82.

[2] 陈晓宇,郑建勇,梅军.基于LC振荡频率变化量的电容器组早期故障在线智能预警方法及其实现[J].电力系统保护与控制,2015,43(5):144-149.

[3] 杨堃,崔博源,宋杲,等.特高压变电站电容器组开合试验回路的电气参数[J].电网技术,2013,37(5):1-5.

[4] 冯顺萍,刘文泽,蔡泽祥.并联电容器组中性线电流不平衡保护的分析研究[J].电力科学与工程,2010,26(2):47-52.

[5] 杨昌兴,赵启承,杨立川,等.并联电容器组保护起始不平衡值的估算[J].电力电容器与无功补偿,2010,31(4):30-35.

[6] 张镇.谐波对艾丁变电站电容系统的影响及对策[J].电气应用,2010,29(18):36-41.

[7] 金向朝,黄松波,陆培钧,等.电容器故障监测系统的应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2008,29(3):40-44.

[8] Cygan P, Laghari J R. Models for insulation aging under electrical and thermal multistress[J]. IEEE Transactions Dielectrics Electrical Insulation, 1990, 25(5):923-930.

[9] Martin Bishop, Tim Day, Arvind Chaudhary. A primer on capacitor bank protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(4):1174-1179.

[10] 陈天翔,张保会,陈天韬,等.新型电容型电力设备 $\tan\delta$ 在线高精度测量系统[J].电力系统自动化,2004,28(15):67-70.

[11] 王晓辉,熊海军,王强,等.基于无线传感网络和GPS的电容器介损角的在线监测[J].华北电力大学学报,2013,40(3):47-52.

[12] 王钰,孙红华.对高压并联电容器组中单台电容值在线监测的研究[J].电力学报,2013,28(2).

[13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.DL/T 584—2007 3 kV~110 kV电网继电保护装置运行整定规程[S].北京:中国电力出版社,2008.

(收稿日期:2015-08-09) EA