

改进的静态阻塞滤波器 LC 失谐故障保护原理

张琦雪¹,徐保利¹,曹天植²,黄天啸²,李焯²,张晓宇³,牛朋飞³

(1. 南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102;

2. 冀北电力有限公司电力科学研究院,北京 100053;

3. 内蒙古大唐国际托克托发电有限公司,内蒙古 呼和浩特 010206)

摘要: 静态阻塞滤波器(SBF)LC失谐保护采用计算电抗器与电容器电流比率(CR)作为判据,当电流中包含非周期性分量或次同步振荡分量时,CR的计算结果会出现波动。对波动原因进行了分析,分析结果表明由于电抗器与电容器电流幅值波动的程度不同,导致电流比率波动。提出电流比率的改进算法,通过差分运算将电抗器电流折算成等效的电容器电流代入电流比率计算公式。仿真结果表明,采用改进算法计算的电流比率受次同步振荡电流和非周期分量的影响较小,这提高了LC失谐保护的灵敏度,使得保护的延时定值可以由10~20 s缩短至0.5~2.0 s范围内。

关键词: 汽轮发电机;次同步振荡;静态阻塞滤波器;失谐保护;继电保护;电流比率;差分算法

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.025

0 引言

汽轮发电机组轴系很长,当汽轮发电机组经过电容补偿的线路长距离输电时,存在异步自励磁、次同步振荡等风险。典型案例是20世纪70年代美国Mohave电厂发生次同步扭振导致大轴损坏,后来不得不一方面调整了电容串补的运行方式,另一方面在机组上安装了轴系扭振保护(TSR)。美国Navajo电厂存在相似问题,为了有效抑制次同步振荡及扭振,在主变压器高压侧装设了静态阻塞滤波器 SBF (Static Blocking Filter)。文献[1-6]对这些内容进行了研究。

我国内蒙古大唐托克托电厂8台600 MW机组,经托源四回线输送至浑源变电站,再经源安双回线、源霸双回线向京津唐电网送电,线路上安装了电容串补。为解决次同步谐振问题,托克托电厂同样装设了 SBF 一次设备,此外配置了 TSR 以及异步自激振荡保护设备。文献[7-16]在串补输送方案、轴系扭振参数测试、SBF中心频率偏移的影响、TSR应用、SBF引起自励磁、异步自激保护、二次回路设计等多方面进行了分析和讨论。

SBF配置了差动保护、接地保护、多组延时过流保护等,其中LC失谐保护是最为重要的保护功能之一,该保护直接反映了并联LC(电抗器与电容器)的参数是否发生了改变。本文阐述了LC失谐保护的基本原理,从理论上分析了现有方法存在电流比率值易受扰动而波动的问题,提出差分计算方法对电流进行变换,提高了保护的可靠性与快速性。

收稿日期:2014-03-14;修回日期:2015-01-12

1 LC失谐保护的基本原理

1.1 SBF

SBF安装在主变高压侧中性点处,电路如图1所示,图中省略了金属氧化物限压器(MOV)过电压保护用的非线性电阻。图中三相 SBF 构成相同,仅具体画出 A 相 SBF 结构。每相 SBF 由电抗器、电容器串并联组成,有4阶电路,其中0阶电路为1个电抗器,1~3阶电路为LC并联电路,并联LC用于抑制特定的次同步频率振荡。

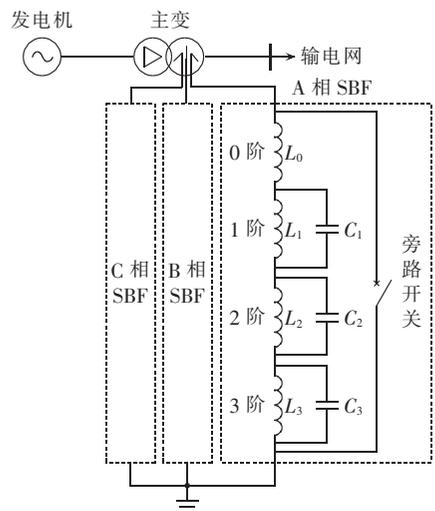


图1 三相 SBF 电路

Fig.1 Three-phase SBF circuit

1.2 LC失谐保护方法

以某一阶的LC并联电路为例,LC失谐保护装置测量该阶电路的电抗器电流 i_L 、电容器电流 i_C 、流过 SBF 的电流 i_{SBF} ,如图2所示。

只计及基波,计算电流幅值(或有效值),则LC

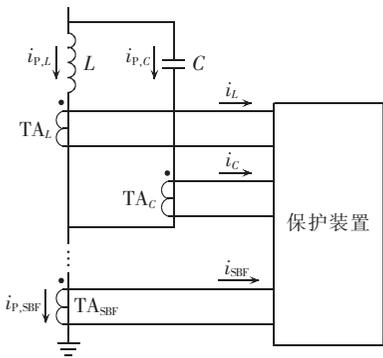


图 2 LC 失谐保护接线

Fig.2 Wiring of LC detuning protection

电流比率 λ_{CR} 为:

$$\lambda_{CR} = \frac{I_{L,m}}{I_{C,m}} = \frac{n_{CT,C} I_{P,L,1m}}{n_{CT,L} I_{P,C,1m}} = \frac{n_{CT,C}}{n_{CT,L}} \frac{1}{\omega_1^2 LC} \quad (1)$$

其中, $I_{L,m}$ 、 $I_{C,m}$ 分别为保护装置计算的电抗器和电容二次电流幅值; $I_{P,L,1m}$ 、 $I_{P,C,1m}$ 分别为电抗器和电容一次电流幅值; $n_{CT,L}$ 、 $n_{CT,C}$ 分别为电抗器和电容的电流互感器(TA)电流变比; ω_1 为基波电流的角频率; L 为电感值; C 为电容值。

由式(1)可知,当只有基波且 LC 参数不变时,电流比率为稳定值;当电容器损坏(并联电容器组的电容单元熔丝熔断或电容单元击穿)或者电抗器出现匝间故障时,LC 参数发生变化,电流比率相应地发生变化。

保护逻辑框图如图 3 所示。图中的保护逻辑设置了 $I_{SBF} > I_{SBF,set}$ 条件,这是因为 SBF 空载运行或较低负荷运行时,电流比率的计算结果会因为分母太小而不准确。根据对现场设备投运情况的观察,定值 $I_{SBF,set}$ 可取 0.2 p.u.,标幺值的基值是对应的电流互感器的二次额定值 5 A。

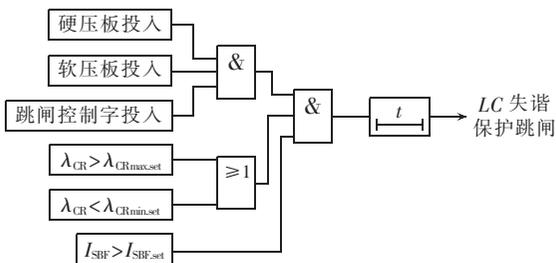


图 3 LC 失谐保护逻辑

Fig.3 Logic of LC detuning protection

1.3 存在的问题

现有 LC 失谐保护是取一个周期的数据窗,采用离散傅氏级数计算方法,得到基波电流 I_L 和 I_C 。该算法可以有效消除稳态电流中的整数次高次谐波,然而当电流存在非周期性分量、次同步振荡分量时,计算出的结果不能反映真实的基波电流,会引起电流比率结果波动。为了躲过系统扰动以及次同步电流的影响,保护只能经过较长延时动作。根据电厂的运

行规程,允许的次同步电流时间长达 10 s,考虑裕量,该保护延时定值整定为 15 s,该延时过长,不能实现快速保护。

2 引起电流比率波动的原因分析

假设 LC 两端的稳态电压包含基波电压和次同步频率电压 2 个部分。

$$u(t) = U_{1m} \cos\left(\omega_1 t + \varphi_1 + \frac{\pi}{2}\right) + \alpha\% U_{1m} \cos\left(\omega_s t + \varphi_s + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

其中, ω_1 为基波角频率; ω_s 为次同步角频率; U_{1m} 为基波电压幅值,次同步电压幅值为 U_{1m} 的 $\alpha\%$; φ_1 、 φ_s 分别为基波和次同步电压的初相位角。

由并联电路,可得电流:

$$\begin{cases} i_L(t) = I_{L,1m} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{\omega_1}{\omega_s} \alpha\% I_{L,1m} \cos(\omega_s t + \varphi_s) \\ i_C(t) = -I_{C,1m} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) - \frac{\omega_s}{\omega_1} \alpha\% I_{C,1m} \cos(\omega_s t + \varphi_s) \end{cases} \quad (3)$$

以基波的数据窗截取电流波形,采用傅氏计算方法得到电流比率(推导过程略):

$$\lambda_{CR} = \frac{I_{L,m}}{I_{C,m}} = \frac{n_{CT,C}}{n_{CT,L}} \frac{1}{\omega_1^2 LC} \frac{|e^{j\varphi_1} + A_\Sigma e^{-j\omega_\Sigma t} + A_\Delta e^{-j\omega_\Delta t}|}{|e^{j\varphi_1} + K^2 A_\Sigma e^{-j\omega_\Sigma t} + K^2 A_\Delta e^{-j\omega_\Delta t}|} \quad (4)$$

$$\begin{cases} A_\Sigma = \left(\frac{\omega_1}{\omega_s} \alpha\%\right) \frac{\omega_1}{\pi \omega_\Sigma} \sin\left(\frac{\pi \omega_s}{\omega_1}\right) e^{j\theta} \\ A_\Delta = \left(\frac{\omega_1}{\omega_s} \alpha\%\right) \frac{\omega_1}{\pi \omega_\Delta} \sin\left(\frac{\pi \omega_s}{\omega_1}\right) e^{j\theta} \\ \omega_\Sigma = \omega_1 + \omega_s, \quad \begin{cases} K = \omega_s / \omega_1 \\ \theta = \pi \omega_s / \omega_1 - \varphi_s \end{cases} \\ \omega_\Delta = \omega_1 - \omega_s \end{cases}$$

由于保护装置计算的数据窗比实际的次同步电流周期短,随着数据窗移动,有时主要截取到次同步电流的峰值区域,计算结果就会偏大;有时主要截取到过零点区域,计算结果就会偏小,因此电流幅值的计算结果是波动的。这在数学上表现为正余弦函数的积化和差、和差化积,幅值计算结果是复平面上 3 个矢量和的模,其中 1 个是常矢量,另外 2 个是方向相同、速度不同的旋转矢量。

从式(4)可以看出, $I_{L,m}$ 与 $I_{C,m}$ 是同步波动的,但是由于波动程度不同(即 $K \neq 1$),最终导致电流比率波动。此处给出一个计算实例: $I_{L,1m} = I_{C,1m} = 1$ p.u., $\omega_1 = 2\pi \times 50$ rad/s, $\omega_s = 2\pi \times 24.27$ rad/s, $\alpha\% = 5\%$, $\varphi_1 = \varphi_s = 0$,其计算结果如图 4 所示(图中电流为标幺值)。

3 算法改进

前文分析结果表明电流比值波动的原因是次同步电流引起电流幅值计算结果波动(非周期分量也会有影响,文中没有分析),由于电流幅值 I_L 、 I_C 波动的程度不同,导致电流比率波动。显然如果电流幅值

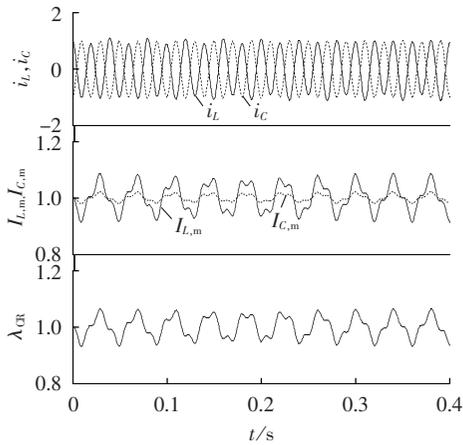


图 4 电流比率的计算结果

Fig.4 Results of CR calculation

波动的程度完全相同,那么电流比率就是稳定的。

LC 并联电路中电抗器电压 u_L 和电流 i_L, i_C 满足如下微分关系:

$$\begin{cases} u_L = n_{CT,L} \left(L \frac{di_L}{dt} + Ri_L \right) \\ i_C = C \frac{du_L}{dt} / n_{CT,C} \end{cases} \quad (5)$$

其中, L 为电感值; R 为电阻值; C 为电容值。

保护装置采样得到离散形式的电流 $i_L(n), i_C(n)$, 利用并联电路电压相同这一约束条件, 对式(5)中 i_L 的离散形式 $i_L(n)$ 进行差分运算, 换算成等效的电容器电流 $i_{Ceq}(n)$, 得:

$$i_{Ceq}(n) = \frac{n_{CT,L}}{n_{CT,C}} \left[LC \frac{i_L(n) - 2i_L(n-1) + i_L(n-2)}{T_s^2} + RC \frac{i_L(n) - i_L(n-1)}{T_s} \right] \quad (6)$$

其中, T_s 为采样时间间隔。

采用全周傅氏计算方法计算 $i_{Ceq}(n)$ 和 $i_C(n)$ 的电流幅值 $I_{Ceq,m}$ 和 $I_{C,m}$, 得到电流比率 $\lambda'_{CR} = I_{Ceq,m} / I_{C,m}$ 。显然, 经过上述变换后, 只要 LC 内部电路没有发生故障, 即使电流出现了非周期分量或次同步振荡分量, i_{Ceq} 与 i_C 也是近似相等的, 因此电流幅值 $I_{Ceq,m}$ 和 $I_{C,m}$ 是同步波动的, 且波动程度相同, 因此电流比率 λ'_{CR} 比前文所述的 λ_{CR} 更为稳定。当 LC 内部电路出现故障时, LC 参数会发生变化, 通过差分折算的 i_{Ceq} 必然与实测的 i_C 结果不同, 电流比率 λ'_{CR} 就可能超出保护定值范围, 经过较短延时保护动作。

4 改进前后实例对比

托克托电厂 7 号发电机的主要参数为: 额定容量 $S_n = 667 \text{ MV} \cdot \text{A}$; 额定功率因数 $\cos \varphi_n = 0.9$; 额定电压 $U_n = 22 \text{ kV}$; 直轴电抗 $X_d = 1.84 \text{ p.u.}$, 交轴电抗 $X_q = 1.84 \text{ p.u.}$; 直轴暂态电抗 $X'_d = 0.24 \text{ p.u.}$, 交轴暂态电抗 $X'_q = 0.24 \text{ p.u.}$; 直轴次暂态电抗 $X''_d = 0.18 \text{ p.u.}$, 交轴次暂态电抗 $X''_q = 0.18 \text{ p.u.}$; 漏抗 $X_\sigma = 0.14 \text{ p.u.}$ 。托克托

电厂 7 号发电机组 SBF 的参数为: 0 阶感抗 $X_{L0} = 28.25 \Omega$ (品质因数 $Q = 100$); 1 阶感抗 $X_{L1} = 9.457 \Omega$ ($Q = 150$), 1 阶容抗 $X_{C1} = 5.272 \Omega$, 1 阶电阻 $R_1 = 0.03 \Omega$; 2 阶感抗 $X_{L2} = 39.578 \Omega$ ($Q = 150$), 2 阶容抗 $X_{C2} = 9.326 \Omega$, 2 阶电阻 $R_2 = 0.34 \Omega$; 3 阶感抗 $X_{L3} = 20.054 \Omega$ ($Q = 150$), $X_{C3} = 3.368 \Omega$; 1 阶、2 阶、3 阶电路频率分别为 33.73、24.27、20.49 Hz。主变参数为: $U_{1n}/U_{2n} = 500 \text{ kV}/22 \text{ kV}$; 额定容量 $S_n = 750 \text{ MV} \cdot \text{A}$; 阻抗电压 $U_k\% = 13.5\%$ 。托源、源安、源霸线的固定串补补偿度分别为 45%、40%、35%。

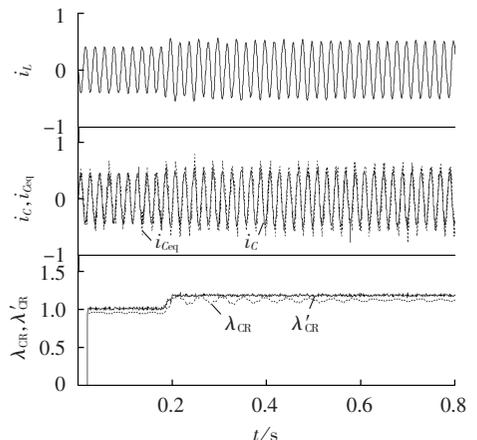
使用上述参数在冀北电科院动模实验室搭建的 RTDS 仿真系统上进行实验, 实时仿真计算的电流经过功率放大器接入保护装置, 模拟了区外的短路故障、区外接地故障、区内接地故障、电容器故障、电抗器匝间故障、系统振荡等多种运行工况。

为验证本文改进算法的有效性, 以 SBF 2 阶电路的失谐保护数据为例, 对数据进行离线计算, 取失谐故障(电抗器匝间故障)、区外短路故障、系统振荡这 3 种工况, 对比算法改进前后的结果。

4.1 电抗器匝间故障

在发电机组半载、出力为 0.4 p.u., 并且输电线路上的电容串补全部退出的情况下, 模拟 SBF 2 阶电抗器的 15% 匝间故障。2 阶电抗器的电流互感器变比是 300 A/5 A, 2 阶电容器的电流互感器变比是 1200 A/5 A。采用本文的改进算法前, 为躲过振荡的影响, 保护延时定值为 10 s, 保护可正确动作。录波数据和计算结果如图 5 所示。

图 5 中电流是标么值, 其基值是电流互感器的额定二次值 5 A, 下同。从图 5 可见, 在 0.2 s 前后发生故障, 故障后电流略有增加, 保护启动。改进算法得到的 $i_{Ceq}(n)$ 和原始电流 $i_C(n)$ 基本吻合, 采用改进算法前, 电流比率 λ_{CR} 在故障发生后持续波动, 而采用改进算法后电流比率 λ'_{CR} 则十分平稳。

图 5 电抗器 15% 匝间故障情况下
电流比率计算结果Fig.5 Calculated CR for 15% inter-turn
short circuit of reactor

4.2 线路近端三相短路故障

在发电机组半载、出力 0.4 p.u. 的条件下,模拟主变高压侧三相金属性短路,持续故障 100 ms 后恢复正常,SBF 完好无故障。录波数据和计算结果如图 6 所示。

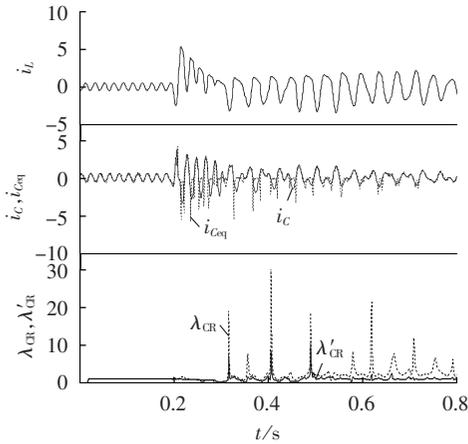


图 6 主变压器三相短路情况下的电流比率计算结果

Fig.6 Calculated CR for three-phase short circuit of main transformer

在 0.2 s 时刻发生故障,故障扰动很大,使 i_L 、 i_C 中出现明显的非周期分量,0.3 s 时故障切除后又出现 LC 谐振。改进算法得到的 $i_{Ceq}(n)$ 和原始电流 $i_C(n)$ 基本吻合,但是在局部有较大偏差。采用改进算法前,电流比率 λ_{CR} 波动非常剧烈,有时接近 30 (正常值在 1.0 附近)。采用改进算法后, λ'_{CR} 一开始也有波动,但是相对较小,在 0.5 s 附近出现的最大值不超过 10,在 0.6 s 之后已经十分平稳。

4.3 次同步振荡

发电机组接近满载、出力 0.8 p.u. 的条件下,模拟系统弱阻尼情况下振荡,使 2 阶电路出现次同步振荡分量,且缓慢发散。振荡初期,保护不会启动,随着发散程度越来越大,LC 失谐保护会频繁启动、返回,依靠较长的延时定值,防止保护误动。录波数据和计算结果如图 7 所示。

从图 7 可知,电抗器电流 i_L 有较为明显的次同步振荡现象,采用改进算法得到的 $i_{Ceq}(n)$ 和原始电流 $i_C(n)$ 基本吻合,采用改进算法前,电流比率 λ_{CR} 波动明显,且持续波动,而采用改进算法后, λ'_{CR} 则十分平稳。

4.4 实例对比的结论

上述实例表明,在 LC 内部故障时,电流比率会发生变化,失谐保护可以动作;原算法的电流比率在故障后会波动,有可能导致保护启动后又返回;采用改进算法后,电流比率平稳,不存在保护启动后又返回的问题。

在区外故障的大扰动下,未采用改进算法时,电

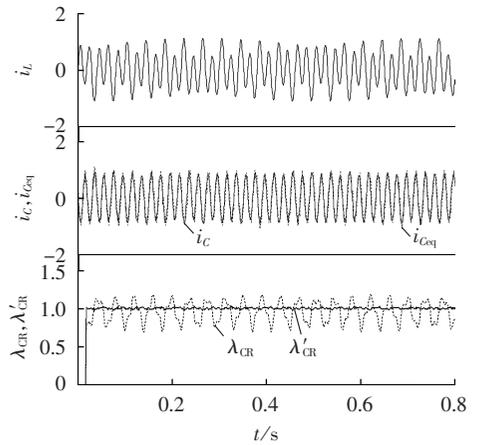


图 7 次同步振荡情况下的电流比率计算结果

Fig.7 Calculated CR for SSO

流比率会有大幅度波动,可能持续 1 s 或几秒;在次同步振荡的情况下,未采用改进算法时,电流比率也会明显波动,且波动会一直持续,波动的程度与次同步振荡的大小有关。为防止误动,只能通过长延时定值躲开振荡。改进后的算法可以使电流比率平稳,即使在区外故障的大扰动下,在 0.5 s 左右时间内,电流比率即可恢复到正常值附近。

由于采用改进算法后,电流比率比较平稳,消除了次同步振荡电流的影响,减弱了大扰动非周期分量的影响,因而一方面电流比率上、下限定值范围可以设定得窄一些,提高保护的灵敏度,另一方面延时定值可以大幅缩短。根据实例计算的结果,延时定值可由 10~20 s 缩短至 0.5~2.0 s 范围内。

5 实际应用还需要考虑的问题

保护装置应用改进算法时,需要增加 L 、 C 、 R 等参数定值,这些参数必须按现场实际参数进行整定。参数误差将导致计算结果出现误差。笔者用 7 号发电机组 SBF 的参数进行试算,结果表明可以忽略电阻 R 的影响。

差分计算会产生计算误差,比如,对于一个离散的电流信号 $i(n) = I_m \cos(\omega n T_s)$,其对应的连续函数为 $i(t) = I_m \cos(\omega t)$,两阶导数为 $-\omega^2 I_m \cos(\omega t)$,离散化后得 $-\omega^2 I_m \cos(\omega n T_s)$ 。

如果采用差分计算,则结果为:

$$\frac{i(k) - 2i(k-1) + i(k-2)}{T_s^2} = \frac{-4I_m \sin^2\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) \cos(\omega k T_s - \omega T_s)}{T_s^2}$$

由上式可见,差分计算既会产生幅值误差,也会产生相位误差。提高采样频率、减小采样时间间隔可以减少误差。目前保护装置每周期(工频周期)24 点采样,对于工频基波电流,差分计算导致的计算误差可控制在 1% 以内。

为解决这些误差的影响,可在理论计算的基础上结合现场实测的结果调整保护定值。如根据本文的方法,理论上 $\lambda'_{CR}=1.0$,保护定值上、下限值分别默认取 $\lambda_{CRmax.set}=1.10$ 、 $\lambda_{CRmin.set}=0.90$;若现场实测结果是 $\lambda'_{CR}=1.02$,则定值调整为 $\lambda_{CRmax.set}=1.02 \times 1.10=1.122$ 、 $\lambda_{CRmin.set}=1.02 \times 0.90=0.918$ 。如果现场实测结果明显偏离 1.0,则应当先查明产生较大误差的真正原因。

6 结语

现有的 LC 失谐保护的基本原理是通过电抗器电流与电容器电流幅值的比率来反映并联 LC 参数是否发生变化,LC 内部故障将引起电流比率的变化。

通过理论推导,说明了电流比率波动的原因是次同步电流引起电流幅值计算结果波动(非周期分量也会有影响),由于电抗器与电容器电流幅值波动的程度不同,导致电流比率波动。

本文提出的改进算法通过 2 阶差分计算,将电抗器电流折算成等效的电容器电流,然后再进行幅值计算和电流比率计算。该算法使电流比率比较平稳,消除了次同步振荡电流的影响,减弱了大扰动非周期分量的影响,因而保护延时定值可以大幅缩短。

计算实例验证了改进算法有效性。LC 失谐保护功能得到改善,一方面电流比率上、下限定值范围可以设定得窄一些,提高保护的灵敏度,另一方面延时定值可以大幅缩短,由 10~20 s 缩短至 0.5~2.0 s 范围内。

参考文献:

- [1] ANDERSON P M. Power system protection,chapter 23 SSR protection[M]. New York,USA:Wiley-IEEE Press,1998:955-999.
- [2] 程时杰,曹一家,江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2009:339-396.
- [3] SUN S C,SALOWE S,TAYLOR E R,et al. A subsynchronous oscillation relay-type SSO[J]. IEEE Transactions on PAS,1981,100(7):3580-3589.
- [4] FARMER R G,SCHWALB A L. Navajo project report on subsynchronous resonance analysis and solutions[J]. IEEE Transactions on PAS,1977,96(4):1226-1232.
- [5] BOWLER C E J,BAKER D H,MINCER N A,et al. Operation and test of the Navajo SSR protective equipment[J]. IEEE Transactions on PAS,1978,97(4):1030-1035.
- [6] BOWLER C E J,DEMCKO J A,MANKOFF L,et al. The Navajo SMF type subsynchronous resonance relay[J]. IEEE Transactions on PAS,1978,97(5):1489-1495.
- [7] 徐政,张帆. 托克托电厂串补送出方案次同步谐振问题的计算和分析[J]. 中国电力,2006,39(11):21-26.
XU Zheng,ZHANG Fan. SSR analysis of series compensation transmission scheme for Tuoketuo power plant[J]. Electric Power,2006,39(11):21-26.
- [8] 吴涛,苏为民,鲍喜,等. 托克托电厂发电机组轴系扭振参数测试[J]. 华北电力技术,2007(11):22-25.
WU Tao,SU Weimin,BAO Xi,et al. Generator rotor shaft torsion parameter identification test in Tuoketuo power plant[J]. North China Electric Power,2007(11):22-25.
- [9] 刘平,马凯,刘辉,等. 托克托电厂阻塞滤波器模态中心频率偏移对抑制次同步谐振的影响[J]. 中国电力,2010,43(1):25-29.
LIU Ping,MA Kai,LIU Hui,et al. Impacts of center frequency offset of Tuoketuo power plant blocking filters on SSR mitigation[J]. Electric Power,2010,43(1):25-29.
- [10] 于海洋,江志文. TSR 保护在托电的应用[J]. 中国电力,2009,42(增刊 1):86-88.
YU Haiyang,JIANG Zhiwen. Application of TSR in Tuoketuo Power Generation Co.,Ltd.[J]. Electric Power,2009,42(Supplement 1):86-88.
- [11] CEN Haifeng,WANG Xitian. Analysis of self-excitation in turbine-generators induced by static blocking filter[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) 2010. Chengdu,China:IEEE PES,2010:1-5.
- [12] 刘世宇,谢小荣,张东辉. 多模式次同步谐振的产生机理与抵制方法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(4):457-460.
LIU Shiyu,XIE Xiaorong,ZHANG Donghui. Mechanism and mitigation of multi-mode sub-synchronous resonance[J]. Journal of Tsinghua University:Science & Technology Edition,2008,48(4):457-460.
- [13] LEE E U,OOI B T. Subsynchronous resonance phenomena considering skin effects in solid iron rotor turbo-generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1988,3(1):140-148.
- [14] 任树东. 可控串补对次同步谐振的抑制作用初步探讨[J]. 国际电力,2005,9(1):56-59.
REN Shudong. A preliminary discussion on damping subsynchronous resonance by TCSC[J]. International Electric Power for China,2005,9(1):56-59.
- [15] 张琦雪,牛洪海,柏传军,等. 汽轮发电机次同步自励磁过电流保护[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):166-170.
ZHANG Qixue,NIU Honghai,BAI Chuanjun,et al. Subsynchronous self-excitation overcurrent protection for turbine generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):166-170.
- [16] 冯辰虎,高永峰,秦俊杰,等. 托克托电厂阻塞滤波器系统二次回路设计的改进[J]. 电网技术,2010,34(5):180-184.
FENG Chenhu,GAO Yongfeng,QIN Junjie,et al. Improvement of secondary circuit design scheme for block filter in Toktuo power plant[J]. Power System Technology,2010,34(5):180-184.

作者简介:



张琦雪

张琦雪(1974—),男,江苏沭阳人,研究员级高级工程师,博士,从事电厂继电保护及自动化装置研发工作(E-mail:zhangqx@nrec.com);

徐保利(1974—),男,内蒙古呼和浩特人,工程师,主要从事电力继电保护研究和工程技术服务工作;

曹天植(1980—),男,河北昌黎人,高级工程师,博士,主要从事电力系统仿真研究工作。

(下转第 172 页 continued on page 172)

sequence protection and its countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 132-135.

- [20] 王建成, 张涛, 王奇文, 等. 秦山第二核电厂 500 kV 出线三相电流不平衡现象的测试及分析[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 76-80. WANG Jiancheng, ZHANG Tao, WANG Qiwen, et al. Testing and analysis of three phase current unbalance at 500 kV outlet of the 2nd Qinshan nuclear power plant[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 76-80.

作者简介:

贾 超(1988—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向



贾 超

为输电线路参数测量、电力系统继电保护 (E-mail: chao_jia@whu.edu.cn);

胡志坚(1969—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源接入与分布式发电、输电线路参数带电测量等 (E-mail: zhijian_hu@163.com);

方佳丞(1987—), 男, 湖北咸宁人, 博士研究生, 研究方向为分布式电源的配电网优化重构 (E-mail: jiacheng_fang@126.com)。

Repeated synchronous non-power-frequency method for measuring grounding resistance of grounding grid

JIA Chao^{1,2}, HU Zhijian^{1,2}, FANG Jiacheng^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation of Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: When the non-power-frequency method is applied to measure the grounding resistance of grounding grid, the induced reactive voltage and resistive voltage will be generated on the voltage electrode lead due to the non-power-frequency current in the current electrode lead. When there are parallel overhead lines of neutral grounding system around the measuring circuit, the measurement is influenced due to the electromagnetic coupling effect between the overhead lines and the measuring circuit. The repeated synchronous non-power-frequency method is proposed to measure the grounding resistance of grounding grid, which reduces the influence of the induced non-power-frequency voltage of voltage electrode lead on the measurement. Simulative results show that the accurate measurement can be obtained under different operational conditions.

Key words: large grounding grid; grounding resistance; non-power-frequency method; parallel overhead lines; repeated synchronous measuring; measurements

(上接第 166 页 continued from page 166)

Improved principle of LC detuning protection for static blocking filter

ZHANG Qixue¹, XU Baoli¹, CAO Tianzhi², HUANG Tianxiao², LI Xuan²,

ZHANG Xiaoyu³, NIU Pengfei³

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100053, China;

3. Inner Mongolia Datang International Tuoketuo Power Generation Co., Ltd., Hohhot 010206, China)

Abstract: The CR (Current Ratio) of reactor current to capacitor current is adopted as the criterion of LC detuning protection for static blocking filter, which may fluctuate when the currents contains SSO (SubSynchronous Oscillation) or non-periodic components. Analysis shows that, the difference between reactor current fluctuation and capacitor current fluctuation causes CR fluctuation. An improved algorithm is proposed for CR calculation, which applies the difference operation to convert the reactor current to the equivalent capacitor current and then calculates CR. Simulative results show that the CR calculated by the improved algorithm is lightly influenced by SSO or non-periodic components, which improves the sensitivity of LC detuning protection and makes the time delay setting reduced from 10~20 s to 0.5~2.0 s.

Key words: steam turbines; subsynchronous oscillation; static blocking filter; detuning protection; relay protection; current ratio; differential algorithm