

DOI: 10.7667/PSPC160319

基于 PSD-BPA 批处理计算方法的电力系统关键设备 故障短路电流累积效应计算

袁宇波¹, 丁昊², 杨毅¹, 王海啸³, 龚雁峰³, 曹军³

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国网江苏省电力公司检修分公司,
江苏 南京 211102; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 目前实际生产中尚缺乏有关电力系统关键设备(变压器、断路器等)短路电流累积效应的计算方法。针对此现状, 提出了一种基于 PSD-BPA 程序包的批处理计算方法。该方法依据实际故障发生时间、故障类型及系统运行方式, 批量计算系统的故障短路电流累积效应。该计算模型已应用于江苏电网。最后, 提出了在电力系统应用的图形化显示设想。根据各设备历史故障电流累积效应来排序, 提供设备状况预警和设备检修优先策略, 将有助于改善电网安全稳定运行状况。

关键词: 累积效应计算; PSD-BPA 批处理; 累积效应图形化显示; 短路电流; 关键设备

Cumulative effect analysis of the short-circuit current of the key equipment in power systems based on the batch operations of PSD-BPA software

YUAN Yubo¹, DING Hao², YANG Yi¹, WANG Haixiao³, GONG Yanfeng³, CAO Jun³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211102, China;

3. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: There is no effective quantitative analysis method in the cumulative effect of the short circuit current which aims at key equipment (transformer, circuit breaker, etc.) in power systems. A fault short-circuit current cumulative effect analysis model based on PSD-BPA simulation procedures is presented for this condition. The model uses batch calculation for several short-circuit faults based on the fault occurrence time, the actual fault type and system operation mode. The paper presents the results of the cumulative effect of a fault in the Jiangsu power grid. Finally, it puts forward the ideas of the graphical display of application in power system. The proposed method can be used to sort the equipment according to the equipment history fault current cumulative effect, and provide early warning and maintenance of the equipment by priority strategy, which will help to improve the safe and stable operation of power grid.

Key words: cumulative effect analysis; PSD-BPA batch operations; graphical display of cumulative effect; short-circuit current; key equipment

0 引言

电网关键设备的安全可靠运行直接关系着电力系统的安全性与可靠性, 电网设备的故障往往会导致恶性事故的发生, 严重影响电力系统的正常运行, 造成财产损失, 甚至危及人身安全^[1]。当电网发生短路故障时, 设备上流过的穿越性短路电流都可能对设备产生一定的影响, 长期多次的累积效应对设备影响更大^[2-3]。对于线圈类设备, 如变压器,

短路电流的过渡过程虽然时间短, 但短路冲击电流将增加到额定电流的 20~30 倍, 甚至更高, 将使绕组遭受到很大的电动力, 并使绕组温度迅速升高, 在高温下, 绕组导线的机械性能下降, 影响变压器安全运行和使用寿命^[4-6]。对于开关类设备, 如高压断路器, 真正影响其触头开断能力的是其开断短路电流的大小和次数。在开断短路电流时, 会产生较强的电弧, 电弧的高温作用会使触头表面烧损、变形、金属材料流失, 造成触头的磨损, 长期来看会

缩短设备使用寿命^[7]。但目前针对故障短路电流的累积效应缺乏有效的定量分析工具^[8-11]。

故障短路电流累积效应分析的关键是如何准确地获取故障短路电流信息^[12]。故障短路电流可以通过录波装置或者仿真计算得到^[13]。而直接利用短路故障发生时系统中故障录波装置或保护信息子站中的数据进行累积效应计算非常方便,但由于之前并没有系统地收集录波数据或因各种原因获取录波数据失败,某些故障发生时刻的录波数据没有办法准确地获取。采用仿真计算的方法可以有效地解决无法准确获取录波信息的情况。PSD-BPA 程序作为一款广泛应用于我国电力系统实际运行和高校科研过程中的仿真软件,拥有成熟的暂态仿真计算程序和短路电流计算程序,开发性良好,可以方便地实现短路电流计算的批处理计算^[14-16]。

本文针对江苏电网全网历史故障数据(包含历史故障和当前故障两种情况)提出了基于 PSD-BPA 仿真程序和短路电流批处理计算的故障短路电流累积效应分析模型,给出了模型的具体参数和计算公式。并根据计算需要设计并实现了基于 PSD-BPA 程序包中暂态稳定计算程序和短路电流计算程序的累积效应值计算批处理分析,实现了累积效应的直接计算,最后,对江苏电网全网数据进行了仿真实验,并在此基础上提出了计算结果可视化的设想。

1 故障短路电流累积效应计算

1.1 故障电流累积效应计算方案

故障短路电流的累积效应计算通过利用故障录波数据或基于电力系统仿真软件 PSD-BPA 的暂态仿真批处理计算功能,依托全网的电气参数、运行方式,建立故障短路电流计算或仿真模型;通过定义设备故障短路电流累积效应,计算在电网发生故障后流过电力系统关键电气设备的(变压器、断路器等)短路电流,并计算短路故障电流累积效应值,进而图形化显示。

由于短路电流累积效应是首次应用于电力系统的,历史故障的累积效应并没有计算。因此,本文提出的电力系统故障短路电流累积效应的计算主要包含两方面的计算内容(如图 1 所示):1)历史故障集数据的累积效应计算,即确定电力系统各关键设备的短路累积效应初始值;2)当前故障的短路电流累积效应值计算。短路电流累积效应初始值与当前故障的短路电流累积效应值之和,即为该设备的短路电流累积效应值。

对于历史故障计算内容 1),因为省公司现有系统并没有系统地收集所有的历史故障的事故障录波数

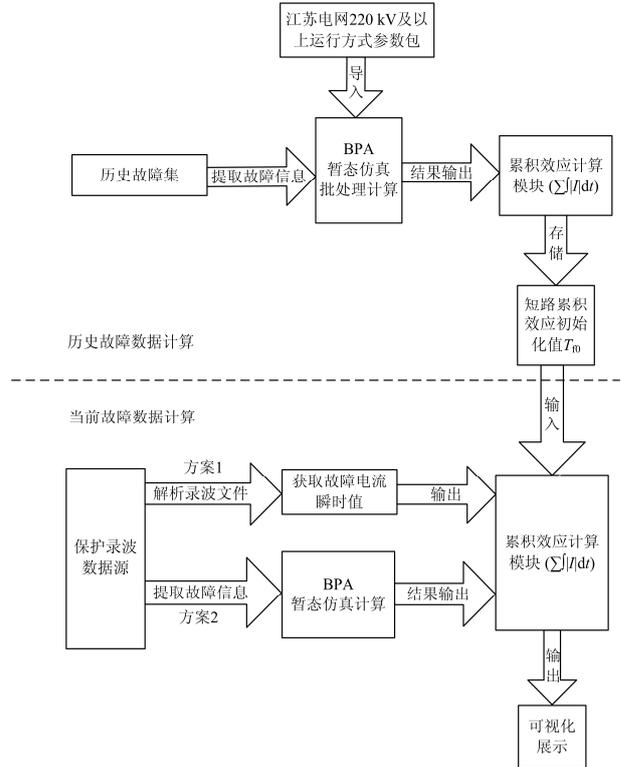


图 1 短路电流的累积效应计算示意图

Fig. 1 Calculation of cumulative effect of short-circuit current

据,我们将开发程序使其自动在省公司故障历史数据库获取所有历史故障信息。对应每个故障,具体信息包括:故障类型(AG, BG, CG, AB, BC, CA, ABG, BCG, CAG, ABC)、故障发生时间、故障清除时间和故障输电线路或母线数据。如果故障发生时历史系统运行方式可以获取,那么故障时刻对应的电网 220 kV 及以上运行方式及故障信息被用来计算系统故障电流;如果故障时历史系统运行方式不能获取,那系统常规运行方式将被用来计算系统故障电流,具体流程如图 2 所示。获得的短路电流即可通过图 2 所示的计算流程得到设备短路累积效应初始值。

对于计算内容 2),故障发生后,如果能够成功自动召唤到对应故障录波,那么故障录波中的具体故障信息会被用来计算故障电流累积效应。如果自动召唤故障录波失败,程序将自动调用 PSD-BPA 软件进行暂态仿真或短路电流计算来获取对应故障电流,详细计算流程如图 3 所示。

1.2 故障短路电流计算

累积效应计算中准确地获取故障短路电流的信息是其关键所在。目前,主要有两种计算短路电流的方法:1)解析故障录波文件,提取故障短路电流信息;2)PSD-BPA 仿真软件计算对应故障的短路电流。表 1 对两种计算方法进行了比较。由于电网没

有系统地收集录波数据或因各种原因获取录波数据失败, 某些故障发生时刻的录波数据没有办法准确地获取。本文主要采用 PSD-BPA 仿真计算的方法实现短路电流计算的批处理计算。

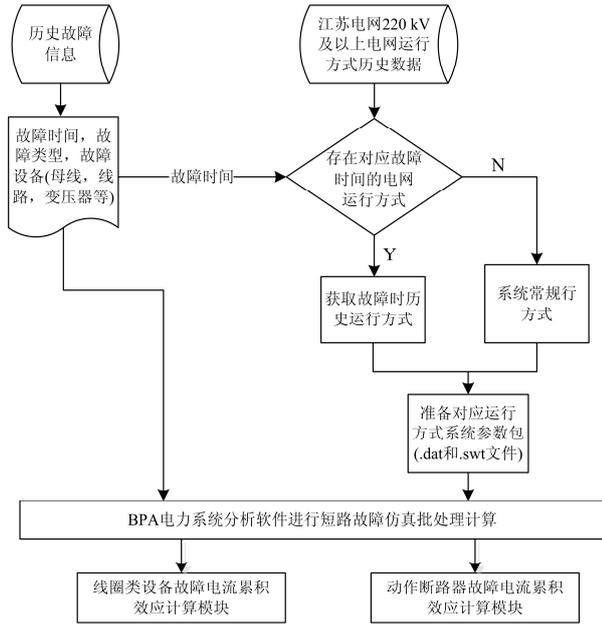


图 2 历史故障短路电流累积效应计算流程

Fig. 2 Calculation procedure for the cumulative effect of the short circuit current of history fault

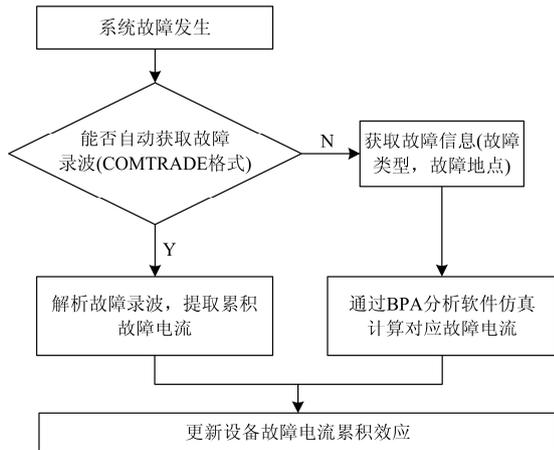


图 3 当前故障短路电流累积效应计算流程

Fig. 3 Calculation procedure for the cumulative effect of the short circuit current of current fault

表 1 故障短路电流计算比较

Table 1 Comparison of fault short-circuit current calculation

计算方式	故障录波装置	PSD-BPA 仿真
优缺点	计算结果精确; 信息不全面或无法获取	易获取; 计算结果不准确

1.3 累积效应计算数学模型

通过故障录波解析或者 PSD-BPA 暂态仿真、短路电流计算程序得到的流过设备各相的穿越性故障短路电流差值 ΔI_{fAi} , ΔI_{fBi} , ΔI_{fCi} , 根据断路器动作时间(或典型故障切除时间)获得短路电流持续时间 $\Delta t_{fi} = t - t_0$, 离散求和, 得到简化的短路电流累积效应评估模型如下:

$$T_{fi} = \max \begin{cases} T_{fA0} + \int_{t_0}^t |\Delta I_{fAi}(t)| dt \\ T_{fB0} + \int_{t_0}^t |\Delta I_{fBi}(t)| dt (i = 1, 2, \dots, n) \\ T_{fC0} + \int_{t_0}^t |\Delta I_{fCi}(t)| dt \end{cases} \quad (1)$$

$$T_f = K_f \cdot \sum T_{fi} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式(1)中分相计算的原因是对称故障, 各相短路电流差别较大, 需要分相累积计算。其中: T_{fA0} , T_{fB0} , T_{fC0} 为设备各相的初始化短路累积效应值, 设备更换和改造时可对其进行更新; $\Delta I_{fAi} = I_{fAi} - I_{fA0}$, I_{fA0} 为稳态电流值, K_f 为模型修正系数, 可通过经验得到; n 为历史故障次数。

2 批处理计算程序

2.1 程序开发依据及思路

BPA 稳定程序是用于分析电力系统在稳态下受到各种干扰时系统动态行为的有力工具。该程序采用的基本解法是: 所有微分方程线性化后用隐式梯形积分法求解; 网络方程采用导纳阵三角分解后迭代求解。

短路电流计算程序 SCCP 是由中国电科院系统所开发, 具有与其推出的 PSD-BPA 程序的潮流和暂态稳定分析程序的数据文件的接口, 可以省去准备网络拓扑数据和相应参数的工作, 方便地进行短路电流的计算。该程序人机界面良好, 计算功能完善, 分析结果方便, 并具有良好的开发接口, 对设计并编写累积效应批处理程序来说非常方便。

稳定程序是与潮流程序结合起来运行的。潮流程序的计算结果作为稳定程序的输入文件参与暂态稳定的计算过程。这是该程序设计的基本依据。

基于 BPA 的批处理计算程序的开发语言为 C#, 图 4 为基于 C# 的程序开发界面。批处理计算程序的基本思路是: 通过后台运行 BPA 的潮流程序和稳定程序, 输出稳定计算结果; 提取结果中的有用数据, 计算相关设备的累积效应值并输出结果。

程序的实现主要分为以下 3 个模块: 输入模块(包括载入文件及设置故障参数)、仿真模块、筛选模块、输出模块。

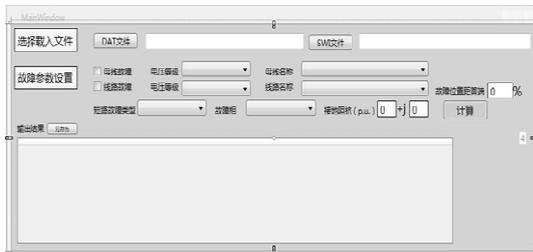


图 4 基于 BPA 批处理计算程序的开发界面
Fig. 4 Interface of batch program based on BPA

(1) 输入模块

输入模块包括两个部分，文件载入部分和故障参数设置部分。

(2) 载入文件部分

分别单击 DAT 文件按钮和 SWI 文件按钮，选择相应的文件，选择成功后，文件的绝对路径和文件名及后缀名会分别显示在两个按钮右侧的文本框里。

文件选择成功后，才可以进行故障参数的设置，否则，将提示未完成文件选择。

进行参数设置的时候，首先选择故障发生在母线上还是线路上，分别单击母线故障选框和线路故障选框进行选择。

(a) 当故障为母线故障时，點選母线故障选框，选框中出现“√”表示选中，这时线路故障选框中不会出现“√”，线路故障选框后的电压等级及线路名称下拉菜单不会加载数据，故障位置距首端后的文本框为不可编辑状态。随后选择故障母线电压等级，选择故障母线名称，选择故障类型及故障相，设置接地阻抗(标么值)。

(b) 当故障为线路故障时，點選线路故障选框，选框中出现“√”表示选中，这时母线故障选框中不会出现“√”，母线故障选框后的电压等级及线路名称下拉菜单不会加载数据，故障位置距首端后的文本框为可编辑状态。随后设置故障线路电压等级，选择故障线路名称，选择故障类型及故障相，设置接地阻抗(标么值)。

(3) 仿真模块

当文件选择成功，故障参数设置成功后，可以进行仿真计算。如果有需要的信息没有选择，当点击计算按钮时，会自动弹出提示框做出相应的提示，做出相应选择后，再继续单击计算按钮即可进行计算。计算使用的程序为 PSD-BPA 程序包中的短路电流计算程序 SCCP.exe，程序的路径写在配置文件中，可以根据需要进行修改。

2.2 程序计算流程

图 5 为采用 BPA 批处理计算的流程图。详细的

计算步骤具体如下。

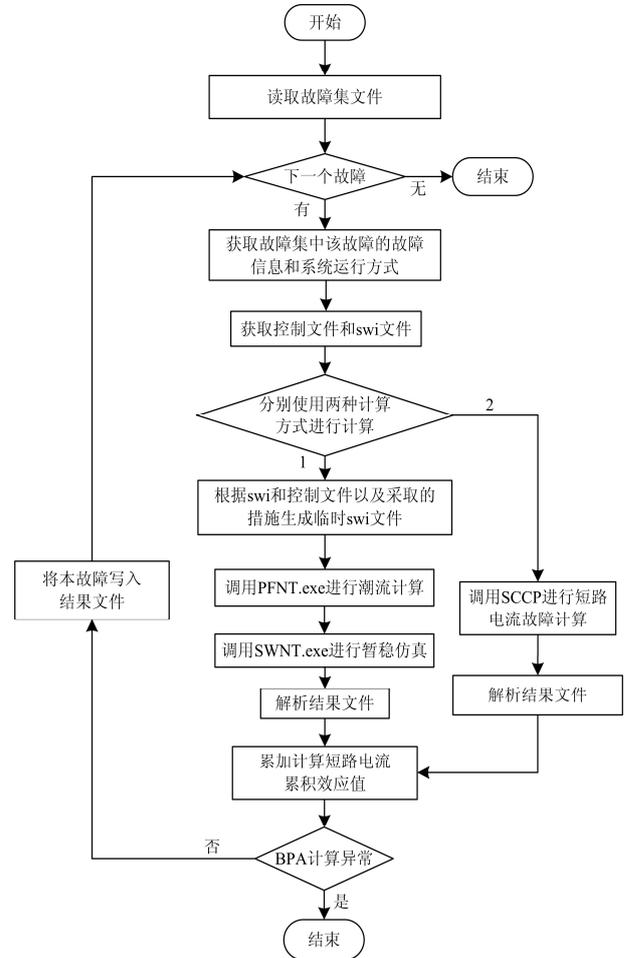


图 5 BPA 批处理计算流程图

Fig. 5 Flow chart of batch computing based on BPA

(1) 读取程序集文件，判断文件中是否有需要计算的下一个故障，若无，则结束程序。

(2) 读取故障集中该故障对应的故障信息，获取系统运行方式文件(*.dat 文件)，控制文件及暂态稳定文件(*.swi 文件)。

(3) 进行第一种计算方式，则进入步骤(4)进行第二种计算方式，则进入步骤(11)。

(4) 调用 PSD-BPA 软件中的 PFNT 程序，加载运行方式文件进行计算，获取故障发生前时刻的系统潮流结果，生成二进制潮流结果文件(*.BSE 文件)。

(5) 读取自定义的控制文本文件，解析出所包含的故障和控制措施；将故障和控制措施转化成 SWNT 程序所能识别的故障卡和故障消失卡。

(6) 读取 SWI 文件，解析出包含的暂态参数数据卡、计算控制卡和输出卡。

(7) 将控制文件中的控制卡以及为了输出故障计算结果而生成的输出卡, 与 SWI 文件中的暂态参数数据卡、计算控制卡和输出卡拼接成一个临时的 SWI 文件, 加载步骤(4)中获得的二进制潮流结果文件, 然后调用 SWNT 程序进行计算。

(8) 读取暂态结果文件(*.SWX 文件), 解析文件结果, 获取需要计算的变压器的电流数据。

(9) 启动计算模块, 根据变压器首末端母线名称判断所计算变压器, 读取变压器累积效应初值, 在此基础上计算累积效应新值, 累加到原值上并进行保存。

(10) 将故障信息及累积效应新值写入结果文件, 进入步骤(1)。

(11) 读取自定义的控制文本文件, 解析出所包含的故障和控制措施, 根据故障信息, 修改所需短路电流计算程序的控制文件(*.CTR)文件中的故障设置信息。

(12) 调用短路电流计算程序 SCCP.exe 程序, 加载控制文件(*.CTR)、潮流文件(*.dat)、稳定文件(*.swi), 进行短路电流计算。

(13) 读取短路电流程序计算结果文件(*.LIS 文件), 解析文件结果, 获取需要计算的变压器的电流数据, 进入步骤(9)。

3 算例

本文采用 IEEE 3 机 9 节点和江苏电网实例对故障电流累积效应的计算模型和方法进行仿真实验验证。

3.1 IEEE 3 机 9 节点算例

IEEE 3 机 9 节点算例如图 6 所示。假设母线 1 在 50 周波发生 A 相金属性接地故障, 故障结束时间为 60 周波。

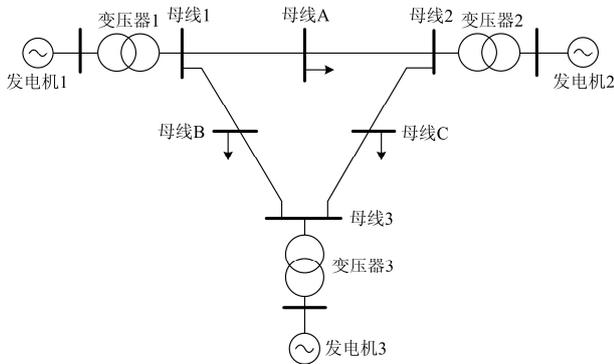


图 6 IEEE 9 点系统示意图

Fig. 6 IEEE 9 bus system

首先采用 BPA 暂态仿真程序模拟故障短路电

流的波形。图 7、图 8 和图 9 分别为流过变压器 1、2 和 3 的短路电流仿真曲线。

表 2 为基于 BPA-SCCP 短路电流计算的短路电流值。计算结果包含基于潮流和不基于潮流的两种方式, 由表 2 可以看出基于潮流的计算方式与暂态仿真的结果更接近。

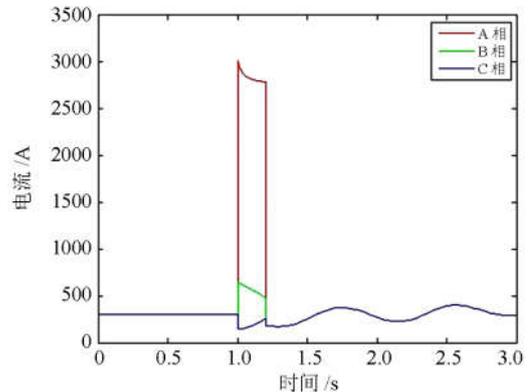


图 7 变压器 1 短路电流

Fig. 7 Short-circuit current of transformer 1

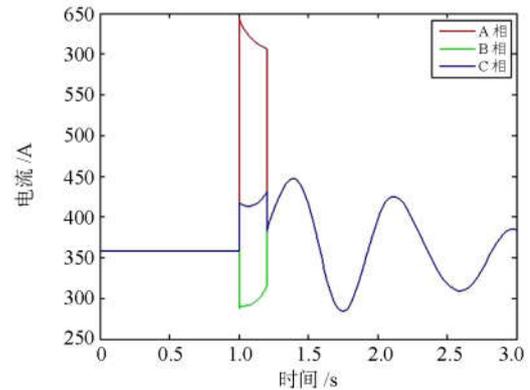


图 8 变压器 2 短路电流

Fig. 8 Short-circuit current of transformer 2

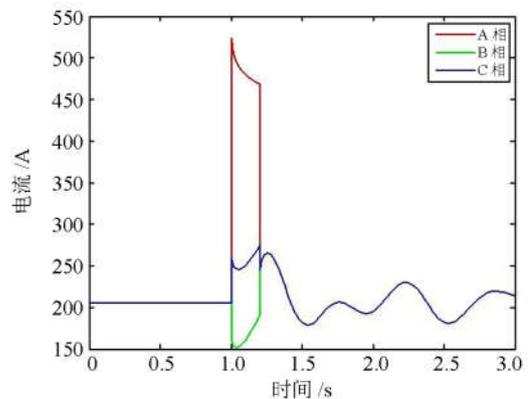


图 9 变压器 3 短路电流

Fig. 9 Short-circuit current of transformer 3

表 2 短路电流计算结果(BPA-SCCP)
Table 2 Calculation results of short-circuit current
by the BPA-SCCP

变压器 名称	kA					
	A 相		B 相		C 相	
	基于 潮流	不基 于潮流	基于 潮流	不基 于潮流	基于 潮流	不基 于潮流
变压器 1	3.0509	3.0851	0.6271	0.2799	0.1161	0.4162
变压器 2	0.6717	0.7001	0.2527	0.2311	0.4448	0.2808
变压器 3	0.5620	0.6817	0.1135	0.2374	0.2864	0.2824

假设备的初始化短路累积效应值 T_{r0} 为 0，模型修正系数 K_f 为 1；历史故障次数 n 为 1，故障持续时间为 0.2 s。变压器 1 各相稳态电流为 299.2 A，变压器 2 各相稳态电流为 357.9 A，变压器 3 各相稳态电流为 205.6 A，故障持续时间为 0.2 s。表 3 为根据式(1)、式(2)计算得到的各变压器短路电流累积效应值。图 10 为图形化的显示结果。

表 3 变压器累积效应计算值
Table 3 Calculation of cumulative effect of transformer

变压器名	kA · s			
	A 相	B 相	C 相*	累积效应值
变压器 1	0.550	0.066	0.037	0.550
变压器 2	0.063	0.021	0.017	0.063
变压器 3	0.071	0.018	0.016	0.071

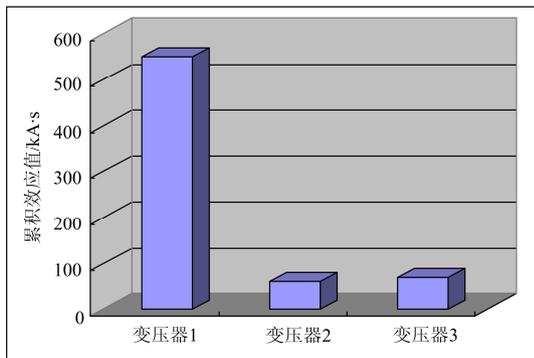


图 10 短路电流累积效应值比较

Fig. 10 Comparison of cumulative effect of short circuit current

3.2 江苏实际电网算例

本文同时采用江苏电网真实数据对算法进行了测试。

故障 1:

故障信息—木渎变到车坊变线路两侧两套主保护动作，A 相跳闸。

故障信息简化—由于程序的需要，将故障处理

为木渎变到车坊变线路中间 A 相接地故障。简化稳态电流为 0。

部分计算结果如表 4、表 5。

表 4 故障 1 短路电流表
Table 4 Short-circuit current values of fault 1

变压器	A 相电 流/kA	B 相电 流/kA	C 相电 流/kA	故障时 间/s
岷珠变 (110 kV/220 kV)	0.2108	0.1054	0.1054	0.05
岷珠变 (110 kV/500 kV)	0.2108	0.1054	0.1054	0.05
武南变 (110 kV/220 kV)	0.5049	0.2525	0.2525	0.05
武南变 (110 kV/500 kV)	0.5049	0.2525	0.2525	0.05
斗山变 (110 kV/500 kV)	0.4081	0.204	0.204	0.05
斗山变 (110 kV/220 kV)	0.4081	0.204	0.204	0.05
惠泉变 (110 kV/500 kV)	0.6684	0.3342	0.3342	0.05
惠泉变 (110 kV/220 kV)	0.6684	0.3342	0.3342	0.05
天目湖变 (110 kV/220 kV)	0.6082	0.3041	0.3041	0.05

表 5 故障 1 累积效应表

Table 5 Cumulative effect values of fault 1

变压器	A 相累积效 应/ kA · s	B 相累积效 应/ kA · s	C 相累积效 应/ kA · s	累积效应 值/ kA · s
岷珠变 (110 kV/220 kV)	0.0105	0.0053	0.0053	0.0105
岷珠变 (110 kV/500 kV)	0.0105	0.0053	0.0053	0.0105
武南变 (110 kV/220 kV)	0.0252	0.0126	0.0126	0.0252
武南变 (110 kV/500 kV)	0.0252	0.0126	0.0126	0.0252
斗山变 (110 kV/500 kV)	0.0204	0.0102	0.0102	0.0204
斗山变 (110 kV/220 kV)	0.0204	0.0102	0.0102	0.0204
惠泉变 (110 kV/500 kV)	0.0334	0.0167	0.0167	0.0334
惠泉变 (110 kV/220 kV)	0.0334	0.0167	0.0167	0.0334
天目湖变 (110 kV/220 kV)	0.0304	0.0152	0.0152	0.0304

故障 2:

故障信息—任庄变到上河变线路两侧两套主保护动作, B 相故障跳闸。

故障信息简化—由于程序的需要, 将故障处理为任庄变到上河变线路中间 B 相接地故障。简化稳态电流为 0。

部分计算结果如表 6、表 7。

表 6 故障 2 短路电流表

Table 6 Short-circuit current values of fault 2

变压器	A 相电流/kA	B 相电流/kA	C 相电流/kA	故障时间/s
上河变 (110 kV/500 kV)	0.2585	0.5169	0.2585	0.05
任庄变 (110 kV/220 kV)	0.5878	1.1755	0.5878	0.05
任庄变 (110 kV/500 kV)	0.5878	1.1755	0.5878	0.05
三汊湾变 (110 kV/500 kV)	0.1352	0.2705	0.1352	0.05
三汊湾变 (110 kV/220 kV)	0.1352	0.2705	0.1352	0.05
东善桥变 (110 kV/500 kV)	0.0503	0.1006	0.0503	0.05
龙王山变 (110 kV/500 kV)	0.0826	0.1652	0.0826	0.05
龙王山变 (110 kV/220 kV)	0.0826	0.1652	0.0826	0.05

表 7 故障 2 累积效应表

Table 7 Cumulative effect values of fault 2

变压器	A 相累积效应/kA·s	B 相累积效应/kA·s	C 相累积效应/kA·s	累积效应值/kA·s
上河变 (110 kV/500 kV)	0.0129	0.0258	0.0129	0.0258
任庄变 (110 kV/220 kV)	0.0294	0.0588	0.0294	0.0588
任庄变 (110 kV/500 kV)	0.0294	0.0588	0.0294	0.0588
三汊湾变 (110 kV/500 kV)	0.0068	0.0135	0.0068	0.0135
三汊湾变 (110 kV/220 kV)	0.0068	0.0135	0.0068	0.0135
东善桥变 (110 kV/500 kV)	0.0025	0.0050	0.0025	0.0050
龙王山变 (110 kV/500 kV)	0.0041	0.0083	0.0041	0.0083
龙王山变 (110 kV/220 kV)	0.0041	0.0083	0.0041	0.0083

注: 电流及累积效应值均为变压器低压侧值

4 图形化显示应用

本论文的结果可以结合系统实际运行故障数据挖掘分析和系统故障仿真来实现对电网故障暂态数

据的分析(如图 11 所示)。

通过精确计算故障清除时间, 分析故障清理时间的趋势找出故障单元, 提高系统运行、规划效率以及可靠性。

通过分析断路器断开时间的趋势找出故障单元, 计算累积故障电流幅值 ($\sum |I| dt$), 优化设备维修调度以节省维护成本, 实现断路器性能监控功能, 采用数据挖掘理论和技术, 通过电网仿真计算, 建立短路电流的累积效应模型, 可以作为设备状态评估和检修的依据, 保证电网设备的安全。

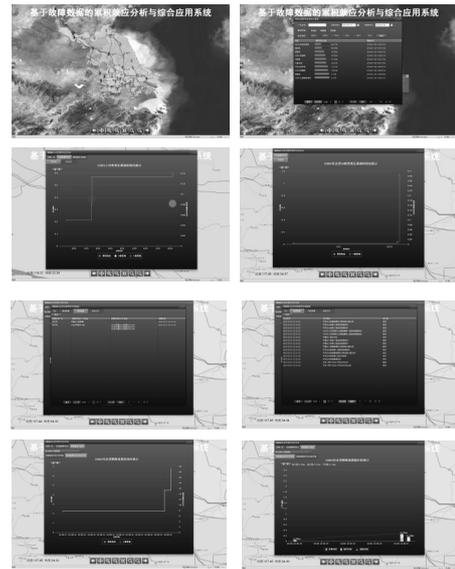


图 11 江苏省实际电网应用显示

Fig. 11 Display of the application using in the Jiangsu power grid

5 总结

本文提出了基于 PSD-BPA 的累积效应计算程序, 介绍了累积效应的计算模型及程序设计思路, 通过仿真对比验证了程序的可行性, 并对实际故障进行计算, 给出了计算结果。所开发的程序已经在实际电网中得到应用, 该系统通过计算流过关键设备的累积效应值, 以此作为评估短路电流对于设备影响的指标, 提升变压器及断路器等电网关键设备的安全运行水平。

(专利申请号: 201510301137.5)

参考文献

- [1] 符杨, 周中明, 潘博, 等. 基于短路冲击累积效应的电力变压器状态检测系统[J]. 上海电力学院学报, 2001, 17(4): 1-6.
FU Yang, ZHOU Zhongming, PAN Bo, et al. The detection system of power transformer based on the cumulative effect of short circuit impact[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2001, 17(4): 1-6.
- [2] 华德峰, 卞超, 甘强, 等. 一起 220 kV 变压器绕组变形

故障分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2):15-17.

HUA Defeng, BIAN Chao, GAN Qiang, et al. Analysis of 220 kV transformer winding deformation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(2): 15-17.

[3] 柯于刚, 顾文雯. 220 kV 主变短路故障后的综合试验分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 21-23.

KE Yugang, GU Wenwen. Analysis of 220 kV main transformer short-circuit fault by using comprehensive test methods[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(2): 21-23.

[4] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 113-117.

GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 113-117.

[5] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.

XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.

[6] 许洪华, 陈冰冰, 弓杰伟, 等. 基于有限元模型的变压器绕组松动研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 23-25.

XU Honghua, CHEN Bingbing, GONG Jiewei, et al. Research on transformer winding looseness using based on finite element model[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 23-25.

[7] 曹炜, 王永生, 张文青, 等. 电力系统短路电流直流分量及其对断路器开断能力的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 283-288.

CAO Wei, WANG Yongsheng, ZHANG Wenqing, et al. Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 283-288.

[8] 张俊杰, 刘兰荣, 刘东升, 等. 用场路耦合模拟变压器线圈部分短路故障电流的方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 65-70.

ZHANG Junjie, LIU Lanrong, LIU Dongsheng, et al. A method of simulating the fault current using field-circuit coupling for partially short-circuited transformer winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 65-70.

[9] 李谦, 蒋愉宽, 肖磊石. 变电站内短路电流分流系数实测和分析[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2060-2065.

LI Qian, JIANG Yukuan, XIAO Leishi. Measurement and analysis on short-circuit current shunt coefficient inside substation[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2060-2065.

[10] 陈倩, 汤奕. 江苏特高压建设时期短路电流限制措施[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(5): 21-24.

CHEN Qian, TANG Yi. A new method of fault location for hybrid transmission line[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(5): 21-24.

[11] 李涛, 陈巍家. 基于符号动力学的变压器内部故障检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 57-64.

LI Tao, CHEN Weijia. Transformer internal fault detection based on symbolic dynamic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 57-64.

[12] 冯煜尧, 祝瑞金, 庄侃沁, 等. 华东电网短路电流计算标准研究[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 74-78.

FENG Yuyao, ZHU Ruijin, ZHUANG Kanqin, et al. Research on the calculation standard of short-circuit current in east China power grid[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 74-78.

[13] 王海港, 黄太贵, 孙月琴, 等. 多变电站故障录波数据同步自动化方法与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 102-107.

WANG Haigang, HUANG Taigui, SUN Yueqin, et al. Auto synchronization method and its implementation of fault recorder data from multi-substations[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 102-107.

[14] 刘楠, 唐晓骏, 马世英, 等. 负荷模型对电力系统短路电流计算的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 144-149.

LIU Nan, TANG Xiaojun, MA Shiyang, et al. Influences of load models on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 144-149.

[15] 文明浩, 杨帆. 基于 PSASP 短路计算的区域电网等值方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 113-117.

WEN Minghao, YANG Fan. An equivalence method of regional power network based on short circuit calculation by power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 113-117.

[16] 张占龙, 郭民怿, 叶云霞, 等. 配电变压器零序电流治理优化方法及装置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 44-51.

ZHANG Zhanlong, GUO Minyi, YE Yunxia, et al. The governance optimization method and device research of zero-sequence current in distribution transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 44-51.

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-05-17

作者简介:

袁宇波(1975-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统保护; E-mail: yyb97104@sina.com

丁昊(1987-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统保护与控制, 电力系统自动化;

杨毅(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制, 智能电网信息安全。E-mail: yang_yi_ce@163.com

(编辑 张爱琴)