

[水电站]

国电南桧河水电站短路电流计算及稳定分析

文/罗 兵 刘莉萍 王 伟

中国市政工程中南设计研究总院有限公司水利设计院

以国电南桧河水电站为例，分别采用短路电流实用计算方法和ETAP计算系统的短路电流进行对比分析，根据计算结果确定了断路器以及变压器设备的选择参数。利用ETAP电力系统仿真软件搭建系统模型，分析了此时系统的稳定性并计算出边界条件。

国电四川电力股份有限公司南桧河发电厂是中国国电集团旗下的一座发电厂，位于四川省雅安市雨城区南桧河乡，是南桧河梯级开发自下而上的第三级电站，坐落于石棉县城以南的南瓜桥上游右岸滩地。该电厂安装3台单机容量40 MW的水轮发电机组，额定电压为13.8 kV，额定电流为1 970 A，功率因数为0.9，采用中性点不接地的运行方式。

南桧河发电厂电气主接线如图1所示。220 kV侧为3/2接线，出线两回，分别为南岭线、南棉线，线路采用LGJQ-500A导线。1#发电机与1#主变压器为发电机-变压器单元接线。2#、3#发电机与2#主变压器为扩大单元接线。

短路电流计算方法

短路电流是指在电路中出现短路故障时所产生的电流。计算短路电流的作用是评估电路在故障状态下的电流大小，它对电气系统的设计、保护设备的选择和系统操作具有重要意义。

计算短路电流的主要目的是保证系统及其器件能够承受短路电流的影响，从而最大程度地降低短路引起的损害。在实际应用中，有几种常见的实用短路电流计算法。

1) 阻抗法（或称为正序阻抗法）。该方法基于电路的等效阻抗来计算短路电流。首先需要确定电

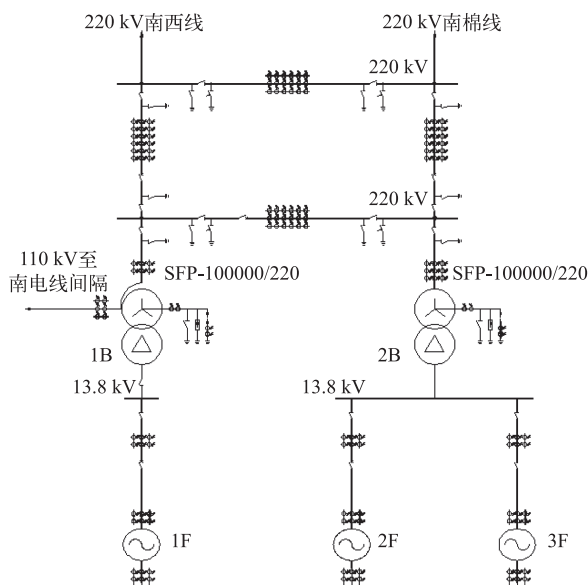


图1 南桧河水电站电气主接线

路中各个元件的等效阻抗；然后通过串联和并联等效阻抗的方法计算整个电路的等效阻抗，最后利用电压源的短路电流公式（短路电流等于电压源除以电路的等效阻抗）计算短路电流。

2) 对称分量法。该方法适用于三相对称电路的短路电流计算。首先通过对称分量分析将三相电路转化为正序、负序和零序三个相互独立的电路，然后计算每个对称分量电路的短路电流，最后通过合成每个对称分量电路的短路电流得到整个三相电路

的短路电流。

3) 标么值法。该方法就是把各个物理量用标么值来表示的一种计算方法。其中标么值可以用物理量的实际值(有名值)与所选定的基准值间的比值来表示,即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值(任意单位)}}{\text{基准值(与实际值同单位)}}$$

在进行标么值计算时,首先要选定基准值(一般选取额定值)。标么值法通常与对称分量法相结合进行计算。

4) 等效电压源法。等效电压源法是应用最为广泛的短路电流计算方法,其计算方法可以简述为:短路电流 I_k 等于路点初始电压 U_N 除以短路点的系统阻抗 Z_k ,即

$$I_k = c U_N / (\sqrt{3} Z_k)$$

式中, c 为电系数。

由上式可见,短路电流的计算结果取决于短路点初始电压 U_N 和系统阻抗 Z_k 。短路电流计算的主要目的就是如何设定初始电压和考虑系统阻抗,从而得到一个兼顾计算精度和设备选型的计算结果。

5) 运算曲线法。在等效电压源法推广之前,运算曲线法是使用较多的一种短路电流计算方法,其基本原理是:在发电机电压和内阻相同的情况下,通过对网络进行化简得到各发电机内电动势和短路点的等效阻抗,根据各个发电机的运算曲线分别求得各发电机的短路电流,将其短路电流进行相加即为短路点的短路电流。此方法计算步骤比较烦琐,精度较低,修正困难,但计算量相对较少。

这些方法都有其适用的场景和条件,并且可能需要一定的电路参数和设备数据作为输入。在实际应用中,通常需要综合考虑电路的复杂性、对称性以及各个元件的特性,选择最合适的方法来计算短路电流。此外,现代电力系统软件也提供了计算短路电流的功能,可以更精确地进行计算和分析。

本文采用四种方式对短路电流进行计算,分别是阻抗法、对称分量法、标么值法及ETAP软件进行计算,并对计算结果差异进行对比分析。

水电站系统短路电流计算及参数选择

1. 系统参数

以下分别为该水电站的四种系统参数,包括220

kV系统参数、110 kV系统参数、变压器计算参数以及发电机计算参数。

(1) 220 kV 系统参数

基准容量 $S_j=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$,基准电压 $U_j=230 \text{ kV}$;正(负)序阻抗 $X_{1(2)}=j0.040 \ 252$,零序阻抗 $X_2=j0.062 \ 360$ 。

(2) 110kV 系统参数

由于无系统资料,按110 kV母线最大短路电流40 kA(有效值,峰值100 kA)反算系统电抗为:正(负)序阻抗 $X_{1(2)}=j0.015 \ 901 \ 8$,零序阻抗 $X_0=j0.015 \ 901 \ 7$ 。

(3) 变压器计算参数

变压器计算参数见表1。

表1 变压器计算参数

项目	1#主变压器(自耦)	2#主变压器
型号	OSFPS-100000/220	SFP-100000/220
容量	100 MV·A/100 MV·A/50 MV·A	100 MV·A/100 MV·A
组别	YNa0d11	YNd11
阻抗电压	高压-中压(U_{12}): 12.4%	13%
	高压-低压(U_{13}): 11.5%	
	中压-低压(U_{23}): 16.8%	

2. 实用短路电流算法

根据上一节中指出的三种短路电流的实用计算方法,利用系统参数对其短路电流进行计算。其中,在进行各侧非等容量三相三绕组变压器电阻与电抗的计算时,电阻根据变压器短路试验有功功率参数进行计算,试验中数据是按小容量对应的额定电流得到,因此进行电阻计算时需要折算。而变压器电抗是按电压百分数进行计算,因此不需要折算。

2.1 三相短路计算

(1) 220 kV母线三相短路电流计算

由系统参数可知,基准容量 $S_j=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$,基准电压 $U_j=230 \text{ kV}$,正(负)序阻抗 $X_{1(2)}=j0.040 \ 252$,220 kV母线三相短路电流计算采用标么值计算方法,其中三相短路电流标么值大小为 $I_3^* = \frac{1}{X_{f\Sigma}^*}$,基准值 $I_B = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j}$,三相短路电流有名值 $I_3 = I_3^* \cdot I_B$ 。根据计算可知:电流标么值 $I_3^*=24.84$;电流基准值 $I_B=0.251 \text{ kA}$;三相短路电流值 $I_3=6.23 \text{ kA}$ 。

(2) 发电机机端三相短路电流计算

发电机机端的三相短路电流采用阻抗法进行计算。其中，正（负）序阻抗 $X_{1(2)}=j0.015\ 901\ 8$ ，零序阻抗 $X_0=j\ 0.015\ 901\ 7$ 。发电机机端的阻抗图如图2所示。

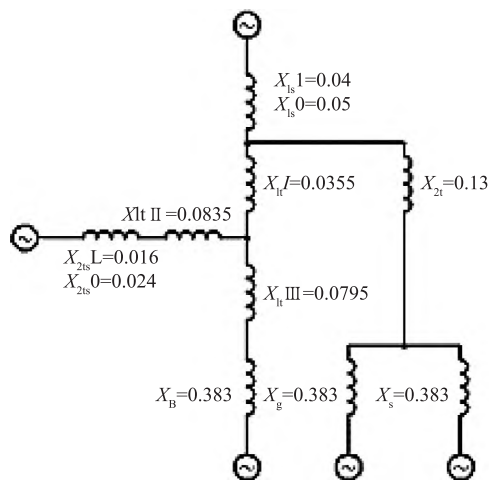


图2 阻抗图

根据计算，1#发电机出口三相短路电流 $I''_{d1}=45.2\text{ kA}$ 。

2.2 单相接地短路计算

(1) 220 kV母线单相接地短路电流

220 kV母线的单相接地短路电流采用对称分量法进行计算，首先画出网络的正序、负序和零序网络图，计算每个对称分量电路的短路电流，最后进行合并。本电站正常运行时，1#变压器中性点接地，2#变压器中性点不接地。

1) 正序网络。220 kV母线单相接地短路正序电抗等效回路如图3所示。

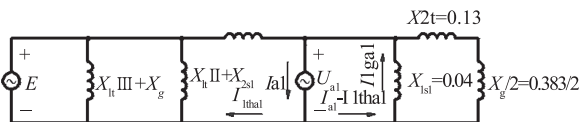


图3 正序电抗等效回路图

经过计算，正序电抗和 $X_{1\Sigma}=0.027\ 5$ 且 $X_{1\Sigma}=X_{2\Sigma}$ 。

2) 负序网络。220 kV母线单相接地短路的负序电抗回路等效如图4所示。

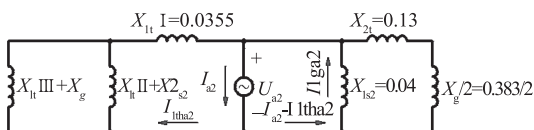


图4 负序电抗回路等效图

3) 零序网络。220 kV母线单相接地短路的零序电抗等效回路如图5所示。

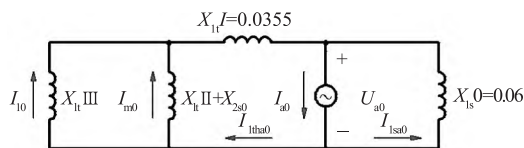


图5 零序电抗等效回路图

经过计算，零序电抗和 $X_{0\Sigma}=0.034\ 7$ 。则 $I_0=3\ I_{a1}=3\ I_j/(2\ X_{1\Sigma}+X_{0\Sigma})=8.4\text{ kA}$ 。其中 $I_{a1}=I_{a2}=I_{a0}=8.4/3=2.8\text{ kA}$ ， $I_{1tha0}=1.182\text{ kA}$ 。

单相接地短路电流计算结果：

① 1#主变高压侧中性点短路电流为 $I_{1th0}=3I_{1tha0}=3.546\text{ kA}$ ；② 220 kV系统侧单相接地短路电流为 $I_{1s0}=3I_{1sa0}=4.854\text{ kA}$ 。

(2) 220 kV升压站接地网反击电位计算

通过对220 kV母线单相接地短路电流及变压器中性点的回流计算，可以进一步计算判断其220 kV升压站的反击电位、接触电动势及跨步电动势是否满足规范要求。同时也可为继电保护提供保护整定依据。

国电南柃河升压站主变压器接地测试电阻 $r=0.47\ \Omega$ ，入地电流 $I=50\%I_{1s0}=2.427\text{ kA}$ ，则反击电位 $U_t=1.141\text{ kV}<2.0\text{ kV}$ ，满足规范要求。

3. 采用ETAP进行短路电流计算

采用ETAP进行短路电流计算的结果见表3。

表3 ETAP短路电流计算结果

	短路电流有效值/kA	短路电流峰/kA
220 kV	8.066	22.124
110 kV	36.29	99.666
13.8 kV I 段母线		
总电流	50.656	138.531
支路最大电流	38.488	105.1
支路0.05 s时直流分量		37.136 (基于50 kA 开断能力时，直流分量开断能力52.5%)
13.8kV II 段母线		
总电流	51.423	140.839
支路最大电流	39.247	107.39
支路0.05s时直流分量		38.723 (基于50 kA 开断能力时，直流分量开断能力54.7%)

4. 总结

采用实用法计算的三相短路电流结果为45.2 kA, 采用ETAP短路电流计算结果为50.656 kA, 两者之间有12%差距。对于产生的误差, 经过分析有以下原因。

(1) 电源电压的选择

实用法电压采用的是平均电压法, ETAP采用的是等效电源法, 结果对比见表4。

表4 实用计算与ETAP法对比

电压/kV	10	35	110	220
实用法电压/kV	10.5	37	115	230
ETAP电压/kV	11	38.5	121	240
倍数	1.047	1.041	1.05	1.043

(2) 阻抗的修正

ETAP短路电流计算中引入了阻抗修正系数, $K_T=0.95[C/(1+0.6X^*)]$, 则双绕组变压器阻抗修正 $K_{2t}=0.97$; 三绕组变压器阻抗修正为 $K_{1tI}=0.97$, $K_{1tII}=0.98$, $K_{1tIII}=0.95$ 。

综合阻抗修正系数取0.96, 对实用法短路电流进行修正为 $I''_{d1}=45.2 \times 1.04/0.96=49$ kA, 与ETAP计算结果误差为3%, 其误差在工程中可以接受。

220 kV、110 kV设备均可选择40 kA(有效值, 峰值100 kA)开断水平设备; 13.8 kV发电机出口断路器应选择50 kA(有效值, 峰值125 kA)开断水平设备, 且由于直流分量含量大于常规断路器的20%~40%水平, 应选用发自机出口断路器。为节省投资, 建议选择发电机出口真空断路器。

系统稳定性分析

本节采用ETAP电力系统仿真软件搭建系统模型, 分析此时系统的稳定性并计算出边界条件。

1. 电气建模

首先对220 kV系统、110 kV系统、发电机、三绕组变压器以及双绕组变压器等进行电气建模。

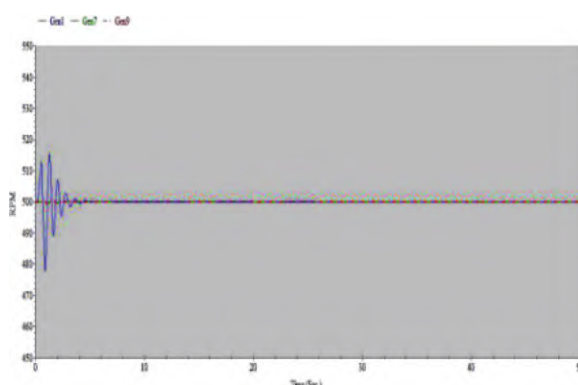
2. 稳定分析

1) 220 kV系统三相短路后故障0.12 s清除, 通过分析发电机1[#]、2[#]、3[#]的转速及功角特性, 可知系统稳定。

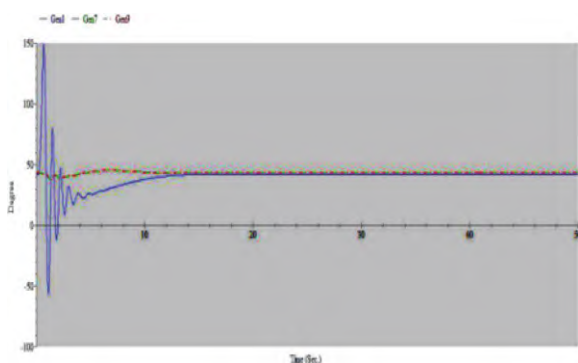
2) 110 kV系统三相短路后故障0.35 s清除, 通过分析发电机1[#]、2[#]、3[#]的转速及功角特性, 可知

系统稳定。

3) 13.8 kV I段母线系统三相短路后故障0.35 s清除。发电机1[#]、2[#]、3[#]转速及功角仿真分析结果如图6所示。结论: 在故障消除后, 发电机1[#]需14 s左右才能恢复稳定, 系统总体稳定。



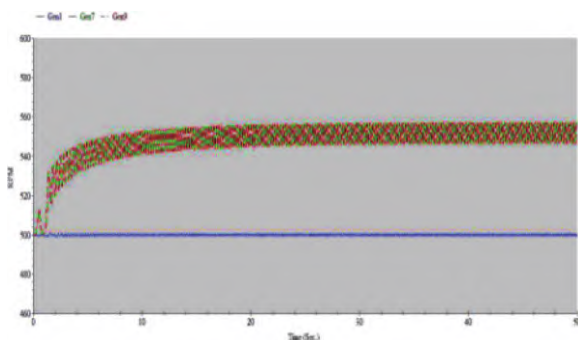
(a) 转速



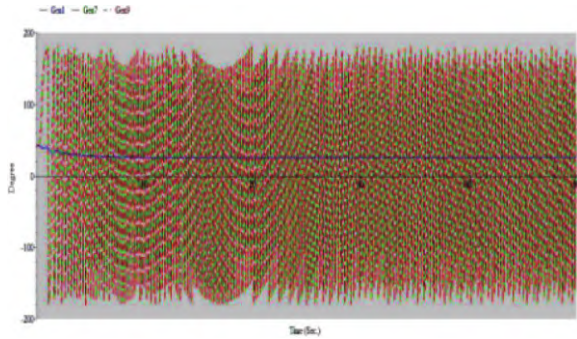
(b) 功角

图6 发电机1[#]、2[#]、3[#]转速及功角波形

4) 13.8 kV II段母线系统三相短路后故障0.35 s清除。发电机1[#]、2[#]、3[#]转速及功角仿真分析结果如图7所示。结论: 在故障0.35 s消除后, 发电机1[#]可稳定运行, 发电机2[#]、3[#]不能稳定运行。



(a) 转速



(b) 功角

图7 发电机1、2、3#转速及功角波形

综上，对其仿真结果进行分析，结果见表5。

表5 仿真结果分析

故障类别	故障消除时间/s				
	0.12	0.2	0.34	0.35	0.8
220 kV系统三相短路	稳定			稳定 极限	
220 kV系统单相短路	稳定				
220 kV系统两相短路	稳定				
220 kV系统两相接地短路	稳定				
110 kV系统三相短路		稳定		稳定	
110 kV系统单相短路				稳定	
110 kV系统两相接地短路				稳定	
110 kV系统两相接地短路				稳定	
13.8 kV I段母线系统三相短路	稳定			稳定	
13.8 kV II段母线系统三相短路	稳定		稳定	失去 稳定	
发电机1失磁					稳定

(上接第64页)

结束语

综上所述，基于已有电力系统的资料与分析结果，构建基于物联网技术的电力线损预测模型，简言之就是利用历史资料，发现可能存在的异常，并发出警告，实现闭环追踪，推动电力系统控制的各项工作向着更加精细的方向发展，保证线损管理的效果尽可能地趋近于最佳状态。EA

(收稿日期：2023-07-20)

参考文献

[1] 侯文东. 基于电力物联网的台区精益管控模式应用[J]. 中国高新科技, 2022(15): 133-134, 145.

3. 边界条件分析

综合上述暂态稳定仿真分析，各发电机220 kV母线故障在0.35 s内清除故障时，均可稳定运行；110 kV母线故障在2 s内清除故障时，均可稳定运行；13.8 kV I段母线故障在0.35 s以内清除故障时，均可稳定运行。13.8 kV II段母线三相短路时，继电保护应在0.34 s以内清除故障，系统可稳定运行，否则发电机2#、3#功角大于180°，运行不稳定。

结束语

通过使用实用计算方法以及ETAP方法计算出短路电流，并对系统稳定性以及边界条件进行分析，可以得出以下结论：

- 1) 13.8 kV发电机出口断路器应选择50 kA(有效值，峰值125 kA)开断水平的真空断路器。
- 2) 三绕组变短路阻抗可取：高压-中压 $U\%=12.4$ ；高压-低压 $U\%=11.5$ ；中压-低压 $U\%=16.8$ ；双绕组变短路阻抗可取13%。
- 3) 机组在220 kV系统、110 kV系统及13.8 kV出线故障的情况下，系统均稳定。EA

(收稿日期：2023-08-04)

参考文献

- [1] 高璇, 王艳红, 车久玮. 浅谈海上电网短路电流计算及限制措施[J]. 电气应用, 2021, 40(9): 93-96.
- [2] 程昱舒, 靳海岗, 王晖南. 基于泛在电力物联网下双向长短时记忆的线损预测计算方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(2): 83-89.
- [3] 张娟, 李俊午. 全时空量测环境下基于双向长短期记忆网络的电力物联网损耗计算[J]. 电子器件, 2022, 45(2): 408-414.
- [4] 仲崇山, 管明睿, 刘筠, 等. 探索基于电力物联网的精品台区建设新模式[J]. 电力设备管理, 2021(9): 36-38, 236.
- [5] 陈佳瑜, 夏澍, 施灵, 等. 基于多系统交互的电缆线路同期线损率异常分析[J]. 电气应用, 2022, 41(3): 67-73.