

「发电」

基于ETAP和EAP软件在煤矸石发电厂短路计算中的应用研究

文/中石油北方工程设计有限公司 董东来

煤矸石发电属于国家煤矸石综合利用的长期支持项目，其作为环保类小型发电，具有不可替代的重要性。电力系统短路电流计算是电力系统设计的重要环节之一，分别采用ETAP和EAP软件建立煤矸石发电厂电力系统模型，对最大运行方式下的短路电流进行计算和分析，最终确定一款更适合的软件完成电气设备校验工作。研究成果可为电气设备校验和选择提供准确的基础工程数据，亦可为电力系统的顺利投产和平稳运行提供有力的技术支持和保证。

电力系统短路电流计算是电力系统规划、设计、运行中必须进行的计算分析工作，因为短路电流可能对电气系统设备和人身安全带来很大威胁。电厂若发生短路，可能导致并列运行的同步发电机组之间的稳定性破坏等危害。由于发电厂的一次电气接线复杂，短路计算工作量很大，故选用合理的计算软件，为发电厂合理选择一次设备有着重要的指导意义。

当前设计部门普遍采用的电力系统短路电流计算标准或方法主要有短路电流实用计算方法、IEC标准或ANSI标准。目前国外普遍应用的短路电流计算软件有ETAP、EDSA等；国内普遍采用的软件有EAP、中国版BPA等。本文采用了ETAP和EAP两个软件进行了分析研究。

所述煤矸石发电厂所在市的煤矸石年增存量多达 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。露天堆放的煤矸石不但占地过大，且污染较重。为解决此类环境污染问题，该市优选了煤矸石发电厂作为环保升级的重点项目。该项目拟新建3台30 MW供热机组（配2台35 MW和1台30 MW发电机）配4台135 t/h循环流化床锅炉。既可解决煤矸石堆放造成的污染，亦可替代现有城区内小锅炉供热，对于该市的节能减排工作具有深远的意义。因此该项目的稳定可靠运行成为了电厂设计之初需要考虑的问题，其中选择一款合理计算软

件完成系统的最大运行方式下的短路电流的计算分析，进而完成电气设备校验工作，起到至关重要的作用，也是本文的主要研究意义。

煤矸石发电厂简介

本项目66 kV侧采用双母线接线方式，66 kV两回出线至附近220 kV一次变电站，3台发电机均以发电机-变压器组接入电厂66 kV系统，接在66 kV母线上。同时设66/6.3 kV高压启动备用变压器1台。发电机出口电压为6.3 kV。

短路电流计算后，可验算导体和电气动稳定、热稳定以及电器开断电流所用的短路电流，按本工程的设计规划容量计算，并考虑电力系统的远景发展规范。确定短路电流时，应按预计发生最大短路电流的正常接线方式，而不按仅切换过程中可能并列的接线方式。通常情况下，三相短路电流最大，但是当短路点发生在发电机附近时，两相短路电流可能大于三相短路电流。

根据项目特点，分别采用ETAP和EAP软件进行计算分析和比较，旨在选择更合理的软件以保证电力系统的短路电流计算的准确性，为整个煤矸石发电厂项目能够安全可靠平稳运行打下良好的设计基础和依据。

系统模型构建

在电力系统分析软件中,想要实现短路分析计算、潮流分析、继电保护配合和电动机启动分析等工作,一般都是以单线图为基础的,ETAP和EAP软件亦是如此。

1. ETAP软件模型

利用ETAP 12.6.0大型电气计算软件建模的电力系统网络是很直观的,可全面体现煤矸石发电厂的电力系统的配置,影响短路电流计算的主要电气设备及元件等均可搭建,为下一步短路电流计算提供了完整的电力系统模型,其中包括发电机、主变压器、电动机等主要模型。因系统模型过大,仅以主接线绘制界面为例,如图1所示。

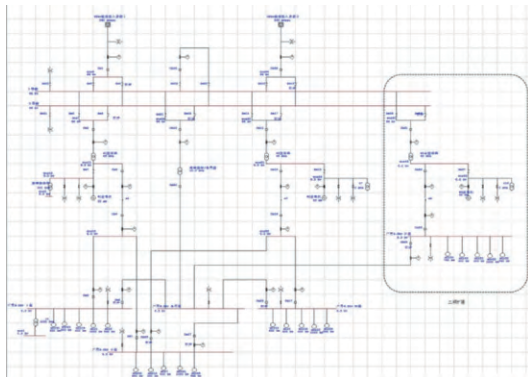


图1 ETAP软件单线图

2. EAP软件模型

利用EAPv11P软件中短路计算模块建模较为简单,可全面体现煤矸石发电厂的电力系统的主要配置,如图2所示。

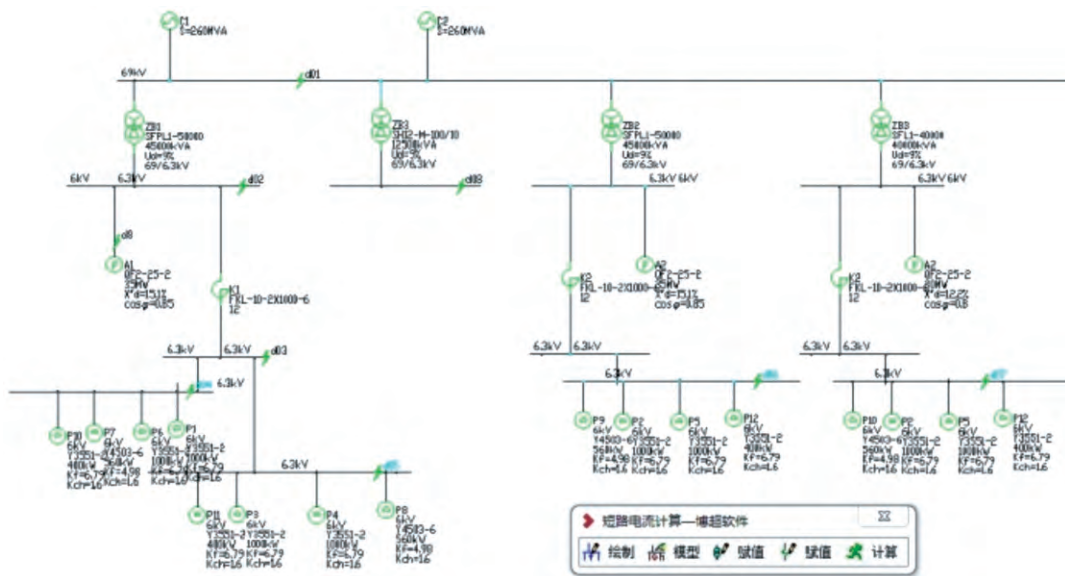


图2 EAP软件单线图

从模型搭建来看,EAP相对于ETAP来说要更简单。

计算方法比较

两款软件采用了不同的计算方法。针对软件采用的计算方法进行了详细的比较分析。

1. ETAP软件

对于ETAP软件在IEC标准,主要对于IEC 60909进行了研究。在IEC标准中采用的短路电流计算方法是短路点等效电压源法。短路点用等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 代替,且为唯一的电压源,其他电源都视为零,IEC中所说的其他电源包括如同步发电机、同步电动机、异步电动机和馈电网络的电势,仅以自身内阻抗代替。在IEC标准中在不同电压情况的最大最小 c 因子有着明确的规定。

IEC标准规定中在最大短路电流计算时,考虑的几个条件为: $c_{\max}$ 因子取1.1考虑;选择电网结构,考虑电厂与馈点网络可能的最大贡献;用等值阻抗 Z_0 等值外部网络时,应使用最小值;满足规范中对于异步电动机和静止变频器驱动电动机的有关规定时,应计及电动机影响;线路电阻采用20℃时的数值 R_{L20} 。

IEC标准中在计算电气设备阻抗时仅在馈电网络中阻抗引入了 c 因子。在如变压器、发电机、发电机变压器组等引入了阻抗校正系数 K_T 、 K_G 、 K_S 、 K_{S0} 。

在短路电流计算过程中,IEC标准中有两个分量,即交流分量和非周期分量。在近端短路和远

端短路情况下，非周期分量，从初始值最终衰减到零；而交流分量在近端短路时是幅值衰减的，在远端短路时是幅值恒定的。

计算短路点的对称短路电流初始值 I_k'' 、对称开断电流 I_b 与稳态短路电流 I_k ，对于三相短路其表达式为

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

同时IEC标准对于单馈入短路、辐射状电源馈电的短路、分接头可有载调压的发变组内的短路电流、分接头不可有载调压的发变组内的短路、网状电网中的短路共计5种三相短路电流等效电路。

对称开断电流，对于远端短路， $I_b = I_k''$ ，对于近端短路对于不同的等效电路引入了不同的 μ 值进行调整。在短路稳态电流计算中引入了不同的 $\lambda_{\max}$

或 $\lambda_{\min}$ 值。

2. EAP软件

对于EAP软件在短路电流实用计算方法进行了研究。在《工业与民用配电手册》《电力工程设计手册（电气一次部分）》《火力发电厂技术规程》中对于短路电流计算有着不同的要求，但基本上均采用了标么值法、运算曲线法来完成短路电流计算工作的。

多采用标么值法进行中高压的系统短路电流计算，另外在计算短路全电流峰值（冲击电流）时引入了冲击系数 K ，根据不同的短路地点如发电机端、发电厂高压侧母线、远离发电厂等地点选用不同的 K 值。

3. 两款软件计算方法介绍

如表1所示。

表1 2种短路电流计算方法介绍

比较内容	工业与民用供配电手册	电力工程电气设计手册	火力发电厂厂用电技术规程	IEC标准
I_k'' 或 I''	I_k'' 短路电流周期分量的初始值（超瞬态短路）电流	I'' 短路电流周期分量有效值	I'' 短路电流周期分量的起始有效值	I_k'' 对称短路电流初始值
i_p 或 i_{ch}	i_p 全电流峰值	i_{ch} 冲击电流	i_{ch} 短路冲击电流	i_p 短路电流峰值 I_b 对称开断电流
远端短路	$X_{\Sigma} \geq 3$	$X_{\Sigma} \geq 3$	发电厂按近端短路考虑	交流分量，短路期间同幅值恒定
电源电压系数不同（>1 kV）	$1.05U_n$	$1.05U_n$	$1.05U_n$	最大短路电流 $C_{\max} = 1.1$ 最小短路电流 $C_{\min} = 1.05$
对发电机短路电流的计算	公式计算法 运算曲线法	运算曲线法	归算到系统电抗（标么值）	同步发电机： $Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX_d'')$ 发变组： $Z_S = K_S (t_r^2 Z_G + Z_{THV})$
元件阻抗	标么值法	标么值法	标么值法	采用复数形式，计入电阻。若电网电压在35 kV以上时可略去电阻
异步电动机的影响	在计算电动机附近短路时才考虑；当与电路点有变压器隔离时不考虑。	计算厂用电时考虑高压电动机的影响	均考虑高压电动机的影响	最大短路电流计算时，必须考虑高压电动机的影响
网络结构	水轮机、汽轮机	水轮机、汽轮机	无明确规定	辐射状网络短路、发变组内的短路、网状电网中的短路
三相短路热效应	$I_{th}^2 T_{th}$	100 MW以下 $\int_0^{t_B} i_B^2 dt = (I_B'')^2 (t + T_B)$	同左	$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_{th}^2 T_K$

软件元件赋值

对于短路电流计算过程中,元件赋值是十分重要的环节之一,由于元件众多,仅从两个区别较大的发电机和变压器元件,进行分别对比。

1. 发电机

如图3、图4所示。



图3 ETAP软件发电机阻抗页

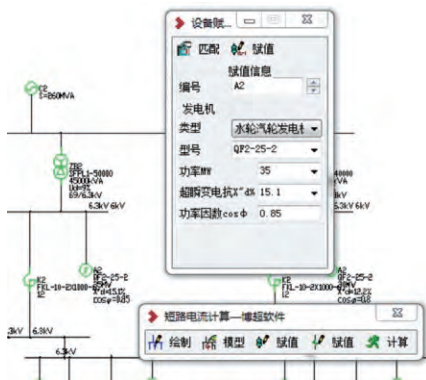


图4 EAP软件发电机阻抗页

2. 变压器

如图5、图6所示。

从上述两个元件对比来看,ETAP软件需要输入大量的基础参数,从工程实际中来看,发电厂会提供除功率、电压、效率、纵轴同步电抗、纵轴瞬变电抗、逆序电抗和零序电抗等参数。若是没有的参数可以利用软件中自带的典型值代替。

EAP软件中发电机阻抗页中仅有简单参数的输入,并且对于发电机类型中只有功率、超瞬变阻抗和功率因数。

ETAP软件相对EAP软件而言输入参数更加全面准确。

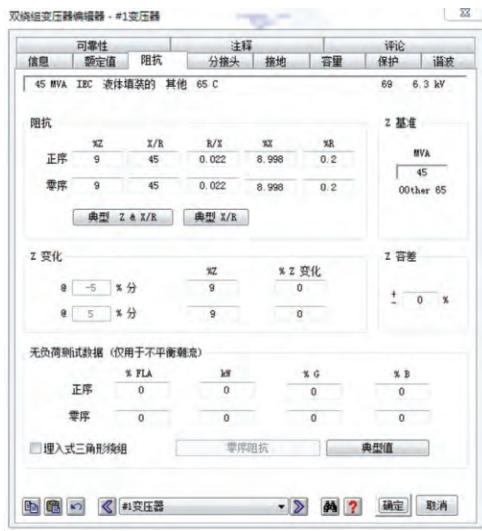


图5 ETAP软件变压器阻抗页

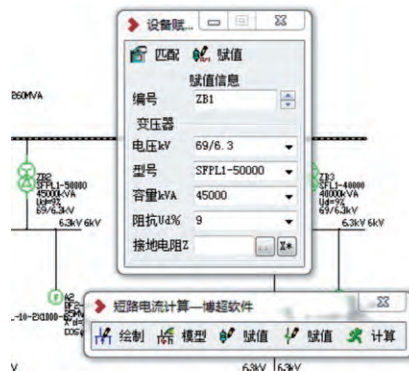


图6 EAP软件变压器阻抗页

计算结果研究

将两种软件仅对于66 kV、发电机出口、厂用工作和备用母线段等多个非常重要的位置进行短路计算,并且对计算结果进行对比分析。

1. ETAP软件

表2 ETAP短路电流计算

短路点	I_k''/kA	i_p/kA	I_k/kA	备注
66 kV母线	9.124	24.094	6.199	
发电机出口6.3 kV母线	63.229	167.275		
电抗器出口6.3 kV母线	20.318	52.598	14.499	
厂用6.3 kV母线 I 段	20.318	52.598	14.99	
厂用6.3 kV母线 II 段	20.318	52.598	14.499	
厂用6.3 kV母线 III 段	17.287	44.619	14.361	
厂用6.3 kV母线 IV 段	16.928	43.683	13.901	
厂用6.3 kV母线备用段	12.303	31.433	12.241	

2. EAP软件

3. 计算结果

从ETAP与EAP软件两款软件的计算结果比较

表3 EAP短路电流计算 (0 s)

短路点	I_g/kA	I_{ch}/kA	i_{ch}/kA	I_g/kA
66 kV母线	9.221	14.925	21.777	13.041
发电机出口6.3 kV母线	61.528	98.181	164.416	87.015
电抗器出口6.3 kV母线	17.673	27.197	46.579	24.994
厂用6.3 kV母线 I 段	17.673	27.197	46.579	24.994
厂用6.3 kV母线 II 段	17.673	27.197	46.579	24.994
厂用6.3 kV母线 III 段	15.378	24.187	40.866	21.748
厂用6.3 kV母线 IV 段	15.498	24.38	41.187	21.919
厂用6.3 kV母线备用段	11.388	18.432	30.6	16.105

分析来看, 66 kV侧母线短路计算误差最小仅为1.06%左右; 厂用6.3 kV侧短路计算误差最大达到13.02%左右。

表4 ETAP和EAP短路电流计算对比

短路点	ETAP I_g''/kA	EAP I_g/kA	相对偏差	备注
66 kV母线	9.124	9.221	-1.06%	
发电机出口 6.3 kV母线	63.229	61.528	2.69%	
电抗器出口 6.3 kV母线	20.318	17.673	13.02%	
厂用6.3 kV 母线 I 段	20.318	17.673	13.02%	
厂用6.3 kV 母线 II 段	20.318	17.673	13.02%	
厂用6.3 kV 母线 III 段	17.287	15.378	11.04%	
厂用6.3 kV 母线 IV 段	16.928	15.498	8.45%	
厂用6.3 kV 母线备用段	12.303	11.388	7.44%	

4. 结果分析

由于各种标准或计算方法的差异, ETAP和EAP软件的计算结果显然不会完全一致, 但差别并不大, 从结果看两款软件比较分析后, 在66 kV母线侧采用ETAP软件完成的短路电流计算偏小, 但偏差仅为1.06%。其他母线段采用EAP软件来完成的短路电流计算偏小, 最小偏差为2.69%, 最大偏差为13.02%, 但也仅为2.65 kA左右。

引起计算结果差异的原因, 主要有以下几点。

1) 各种标准的差异。由于考虑的侧重点不同, 中间计算途径不同所造成的, IEC标准和国内如《工业与民用配电手册》《电气工程电气设计手册 (电气一次部分)》《火力发电厂技术规程》关于实用短路电流计算的方法和定义也均有差异, 相关定义差别如表1所示。

2) 计算方法的差异。IEC计算方法的优点

采用了等效电压源法, 不需要考虑发电机励磁特性; 实用短路电流计算法的特点是根据国产同步发电机参数和容量配置的基础上, 采用了概率统计方法, 订制出短路电流周期分量运算曲线, 计算较为简便。

3) 模型参数的差异。EAP软件在短路电流计算中, 尤其是在发电机的计算中采用的方法过于简单, 并不具备ETAP软件采用了较多的技术参数参与计算。

为了对电气设备进行动热稳定校验, 校验时使用的是最大运行方式下的短路电流, 此短路电流决定了校验的基准。尽管两款软件的计算差异是在可接受的范围内, 但最大的短路电流值对于设备的校验更加严格, 故本文采纳了ETAP软件的短路电流计算结果, 充分保证了一次设备动热稳定计算基准的可靠性。

结束语

从软件模型、软件的计算方法和计算结果等方面进行了分析, 通过煤矸石发电厂项目进行了两款软件的应用计算。综合分析, 总结如下。

1) 本文中利用的ETAP软件是按照IEC60909标准的计算方法及要求的计算软件。因此参数录入的比较繁杂细致, 若无准确参数的情况下可以利用软件的典型数据替代。

2) EAP软件主要参照的是短路电流实用计算方法, 参数录入简洁, 且可以生成系统阻抗图。

3) ETAP和EAP软件的差异尚在可接受的差异范围内。

4) IEC方法目前在国际上广泛应用; 国内已在独资、合资项目及对外项目设计中使用。

5) 短路电流实用计算法, 计算简便, 在国内电力行业得到了非常广泛的应用。

尽管短路电流实用计算法为我国电力系统短路电流计算立下了汗马功劳, 然而随着我国电力系统迈向国际的步伐日益加快, 对于国外项目和国外投资的项目, 业主仅认可类似ETAP国际计算软件, 所以我们需要认真研究ETAP等国外软件的应用, 为我们更好地走向国际市场打下良好基础。另外本文也对于我公司未来推广采用ETAP软件进行短路电流的计算提供了宝贵的指导意义。EA

(收稿日期: 2017.05.30)

(编辑: 刘群焱)