

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180764

PSASP 与 PSDE-SCCP 短路计算的对比分析研究

章勇高¹, 李小蓓¹, 方华亮², 苏永春³

(1. 华东交通大学, 江西 南昌 330013; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072;
3. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 随着我国特高压工程的推进, 大电网互联程度不断加强, 短路电流的超标问题日益严重。目前电网短路电流计算两个软件 PSASP 及 PSDE-SCCP 的计算结果有着较大的差异, 影响到电网的规划及决策。分析了短路计算的主要影响因素, 并根据国内现有短路电流计算标准, 研究两种程序基于不同方式下的短路电流计算结果。结合实际电网运行情况, 对比分析两种程序在相同条件下不同电压等级及其负荷模型类型的短路电流计算的差异, 得到同种条件下的短路电流的差异主要来源于标准的不统一及不同的负荷处理方式。根据研究计算结果, 提出基于两个程序软件的适用于实际电网的不同负荷模型比重下的短路电流计算的规划的设置标准。并结合实际电网进行验证, 为电网的建设规划中短路电流的计算提供合理的参考依据。

关键词: PSASP; PSDE-SCCP; 短路计算差值; 计算方法; 设置标准

Comparative analysis and study of the short-circuit calculation based on PSASP and PSDE-SCCP

ZHANG Yonggao¹, LI Xiaobei¹, FANG Hualiang², SU Yongchun³

(1. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: With the development of the UHV project in China, the connectivity of large power grids has been strengthened, and the problem of exceeding the standard of short circuit current is becoming more and more serious. PSASP and PSDE-SCCP are two main softwares for short-circuit current calculation at present in China. However, there are great differences between these two softwares' computing result, affecting power grid planning and decision-making. This paper analyzes the main influence of the short circuit, and compares two kinds of program based on the short-circuit current calculation results under the different ways according to the existing short-circuit current calculation standards in China. Considering the actual operating conditions in the power grid, under the same conditions, it compares and analyzes the differences in the short-circuit current calculations for different voltage levels and load model types for these two programs. According to the results of the studies, the set standard of the short circuit current calculation based on the two program softwares is apply to the different load models under the specific gravity of the actual power grid. Combined with the actual power grid, the calculation of short-circuit current in the planning for the construction of power grid provides reasonable reference basis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467006).

Key words: PSASP; PSDE-SCCP; difference of short circuit calculation; calculation method; setting standard

0 引言

特高压工程建设逐渐加快进程, 电网互联程度和规模不断扩大, 电网之间的电气联系更加紧密, 短路电流超标问题也越来越严重^[1-3]。而电网的规划

设计必须要考虑短路电流水平的限制问题, 其中准确的短路电流计算是确定断路器设备选型及短路限流措施的前提^[4-5]。

目前, PSASP 及 PSDE-SCCP 作为电力规划部门常用的两种短路电流计算软件, 其计算结果的差异将直接影响电网分析与规划。因此, 有必要对这两种软件进行对比研究, 确定出合适的计算标准。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51467006)

文献[6]通过对 PSASP 软件短路计算模块的分析,并结合某省的短路水平,提出相应的措施及建议。文献[7]对基于中国版的 BPA 的 2 种计算方法,5 种计算模式进行分析总结其差异,并提出适合该电网规划的设置条件。文献[8-9]分别介绍了 IEC60909 与 PSASP 模块的差异及华东电网常用的 5 种短路电流的计算方法,通过对其结果精确度分析,总结出各算法之间的差别及对短路电流计算结果的影响因素,并提出适合华东地区的短路算法标准。文献[10]通过对 PSASP 2 种短路计算方式的对比分析,指出基于潮流的短路计算其结果更贴切实际值。文献[11]针对 PSD-SCCP 中基于潮流及基于网络 2 种方式的分析,提出基于潮流的计算方式用于网架校验较为合适,而基于网络的计算方式则比较适用于对运行方式的规划和校验。文献[12-13]分析了目前关于短路电流计算的相关标准,总结了各标准之间的差异,同时结合实际电网得出其存在差异的原因在于标准的不统一及对负荷的处理差异。文献[14]分析比较了 BPA 及 PSASP 对江西电网短路电流的计算结果,总结出不同计算结果产生的原因,其结论对于电网短路计算方案的选择具有重要的参考价值。

虽然现有文献对 PSASP 及 PSDE-SCCP 计算结果进行了一定的分析,但缺乏对短路电流计算结果的影响因素分析,且所引用的计算标准也具有一定的局限性,对不同软件下计算得到的短路电流的分析不够具体。本文分析软件中的常用计算标准及差异,分析影响短路计算结果的因素。基于 PSDE-SCCP 和 PSASP 的短路电流水平的差异,研究了不同设置条件及不同负荷比重对计算结果的影响。同时,提出合适的计算条件设置,实现两软件在短路计算结果上的一致性,为电网短路计算标准的制定提出参考意见。

1 短路电流计算的影响因素

随着特高压的接入,电网规模的不断扩大,大电网之间的互联程度日趋紧密,短路电流问题日益严重。在对电网的网架规划设计、运行控制时,三相短路计算是必要的前提工作之一。短路计算公式为

$$I_k'' = cU_N / (\sqrt{3}Z_k) \quad (1)$$

式中: cU_N 为等值电压源的基准电压 (U_k); c 为电压系数; Z_k 为短路阻抗。因此,对于短路电流计算结果的差异,主要来源于 U_k 、 Z_k 两个因素的不同。

(1) U_k 的影响分析

结合 $U_k = cU_N$ 分析,对 U_k 的影响主要取决于电压初值的设置及电压系数的取值。电压初值的设

置,即对网络节点初值的设置,设置不同,直接引起等效电压源的不一致;其次是电压系数 c 的取值,在不基于潮流计算短路电流时,由于短路计算所采用的电压通常为系统最高电压,因此电压系数通常的取值为 1.05~1.10。而在基于潮流计算时,电压值取自潮流计算结果,因而这一因素不再进行考虑。

(2) 等值阻抗的影响

在进行近似计算时,通常忽略系统电抗、输电线对地电抗及负荷等的影响,做最简化计算。而在进行精确计算时,还会考虑相应负荷及无功补偿等对短路电流的影响。在电力系统网络中,负荷模型主要包括恒阻抗、恒电流、恒功率及感应电动机四种,各负荷模型所占比重的大小对短路电流的结果有一定的影响^[15-16]。以感应电动机负荷为例,感应电动机定子电流周期分量的有效值为

$$\dot{I} = -j \times \frac{\dot{U} - \dot{E}}{x''} \quad (2)$$

在短路瞬间,如果感应电动机与短路点之间的电气距离较近,电动机 $E'' > U$, 电流的方向发生变化,电动机处于发电机状态,可作为附加电源,向短路点反馈短路电流,与之相反,若感应电动机与短路点距离较远,则其仍处于电动机状态,不再向系统反馈短路电流^[17-19]。

在对短路进行计算时,无论是精确计算还是对系统短路故障进行简单估算,以上两点均为需要着重考虑的影响因素,亦为不同软件计算结果差异的原因所在。

2 两种软件计算设置比较

PSASP、PSDE-SCCP 程序软件在对短路电流进行计算时均有两种计算基础方案:基于潮流及基于方案算法的短路计算。基于潮流的短路计算作业,前提是该潮流作业必须是计算得到的收敛潮流作业。在该计算方式下,短路计算的数据来源于所基于的潮流作业的数据及结果。而基于方案的短路计算,基础数据则取自所基于的方案,但也需选择一个潮流作业作为短路计算库,所选潮流可不进行计算,不影响短路计算结果。

基于潮流的计算方式结合故障前的电压及相应电流分支的影响,忽略了系统分支电流相关的负荷分量,得到的短路电流与实际值有一定的差异。但两个软件在这一计算方式下的原理基本相同,因此,该方式下的计算结果理应差异不大。

基于方案的计算方式,在进行简单故障计算时,每个软件都有着不同的设置条件,每种设置条件下对电压系数、线路阻抗、负荷模型及变压器变

比等条件的选择不尽相同, 因此计算得到的短路电流结果也存在差异^[20]。具体设置条件分析如下所示。

2.1 PSASP 的计算条件

基于方案算法的短路电流计算是一种对短路电流的估算方法, 在基于方案进行简单故障的短路电流计算时, 主要有以下 5 种设置条件。

(1) 设置 1: 按照 PSASP 基本计算方法进行计算。在此计算条件下, 不计负荷的影响, 发电机电势设置为 $1\angle 0^\circ$ p.u., 在只进行短路计算时, 同步电动机模型可选 0 或是 4, 参数值设置为 0, 此时的发电机电抗为 X'_d ^[21]。

(2) 设置 2: 按照继电保护整定规程进行计算(行业标准)。对负荷及发电机的处理方式与设置 1 相同, 其次, 不计变压器非标准变比、支路电阻及线路对地电容($B/2$)等的影响。

(3) 设置 3: 按照国家电网安全稳定计算技术规范进行计算(企业标准)。在该计算设置下, 可对“考虑电压系数 c ”及“考虑负荷”两个条件进行选择。对于线路电容, 只计及高抗下的无功补偿。

(4) 设置 4: 按照国家短路计算标准计算, 此计算条件与 IEC60909 标准基本一致, 包括考虑电压系数 c 、忽略并联电容电抗器、忽略线路对地电容($B/2$)、忽略变压器非标准变比。在 IEC 新标准中规定 1 kV 以上的中压或高压系统, c 的取值范围为 $1.00 < c < 1.10$ 。

(5) 设置 5: 自定义条件。程序提供考虑电压系数、忽略并联电容电抗器、忽略线路对地电容($B/2$)、忽略变压器非标准变比、忽略支路电阻等选项可以供选择。如果没有选择“考虑电压系数”项, 则程序按照发电机内电势为 $1\angle 0^\circ$ p.u.的方法计算。无论怎样选择计算条件, 在计算时均不考虑阻抗修正系数。

不同设置条件对网络电压源及负荷等的处理方式不同, 将直接影响短路电流的计算结果的差异。主要原因取决于 U_k 、 Z_k 两个因素。随着特高压的逐渐接入, 线路电容的充电功率的增加, U_k 的影响变得更为重要。而从负荷的处理方面分析, 部分设置条件不计及负荷的影响, 将会出现短路电流不随负荷的种类及其比重的变化而变化的现象, 在一定程度上影响电网的规划分析。

2.2 PSDE-SCCP 的计算条件

基于方案算法对短路电流进行计算, 可忽略一些不必要的条件, 仅对能够影响短路结果的因素进行设置, 分为 5 种设置方式, 具体如下所述。

(1) 设置 1: 经典假设条件。在该设置方式下, 考虑电压系数 c , 考虑线路和变压器电阻, 变压器

均采用标准变比。忽略负荷、并联无功补偿及线路充电功率的影响。

(2) 设置 2: 旧版 SSCP 计算条件。在该设置方式下, 母线电压取 $U=1.05U_N$, 考虑静态负荷、并联无功补偿、线路充电功率及线路和变压器电阻。

(3) 设置 3: 采用 IEC60909 算法(在测试阶段), 忽略负荷。考虑电压系数 c , 母线电压通常取值为 $U=1.1U_N$, 考虑线路和变压器电阻。

(4) 设置 4: 采用 IEC60909 算法(在测试阶段), 考虑负荷。考虑电压系数 c , 母线电压通常取值为 $U=1.1U_N$, 考虑线路和变压器电阻。

(5) 设置 5: 自定义条件。可选择是否计及无功补偿设备、交流线路的充电功率、停运的机组、交流线路、变压器支路的电阻及变压器支路的非标准变比等。

PSDE-SCCP 采用的电压源基准电压通常为 $1.05U_N$, 普遍低于 PSASP 特定计算条件下的电压值, 这也是造成 PSASP 短路电流普遍较高的一个原因。总的来说, U_k 、 Z_k 的不同的处理方式, 对短路电流的计算结果造成一定的影响, 对此, 两软件的不同处理方式引起其短路结果的差异。

2.3 两软件设置上的差异比较

在基于方案的短路计算中, PSASP 与 PSDE-SCCP 均有多种设置条件, 部分设置条件相似, 表现在对变压器变比、线路阻抗及负荷阻抗的处理方式上, 但在具体选择方案上所考虑的条件因素存在着不同, 其不同的考虑因素将直接影响短路电流的计算结果; 其次, 在对电压系数的取值上, 两软件在不同设置条件下的取值不同, 相同条件下的电压系数取值也不尽相同, 这也是造成两软件计算结果差异的原因之一。

3 两种软件的算法比较

3.1 基于潮流计算

对 PSASP 计算中采用 PSASP7.31 版本, 而对于 PSDE-SCCP 在计算中采用 PSDE-SCCP V2.0.1.4 版本, 结合某省电网的三相短路电流的实例计算, 采用基于潮流的计算方式, 同时改变感应电动机负荷比重进行短路计算, 通过对计算结果的分析找出 PSASP 及 PSDE-SCCP 基于潮流的短路计算算法的特点。

3.1.1 PSASP 基于潮流算法的不同负荷模型

PSASP 的基于潮流算法的短路计算是一种采用叠加法, 综合考虑线路及变压器电阻, 并联无功补偿等的精确算法。受计算人员对机组安排、经验的影响, 对于是否符合实际运行情况的潮流优化结

果, 其短路水平与实际值存在着一定的差异。以某省电网为例, 其负荷为恒阻抗负荷模型与感应电动机负荷模型各占 50% 的综合负荷模型。在基于潮流的计算方式下, 改变负荷比例, 计算 500 kV 母线三相短路电流, 结果如表 1 所示。

表 1 PSASP 基于潮流的短路电流计算结果

母线名	不同感应电动机比重下的短路电流结果/kA				
	0%	25%	50%	75%	100%
YX	39.005	43.246	46.12	48.058	49.439
MS	35.73	39.418	42.254	44.041	45.317
NC	35.668	39.846	42.72	44.691	46.115
FZ	34.521	38.041	40.21	42.095	43.286
LF	29.949	33.888	36.657	38.59	40.005
YT	32.454	35.683	37.902	39.435	40.548
LP	31.622	34.995	37.343	38.984	40.188
JX	31.453	34.646	36.815	38.291	39.354
FZD	30.811	33.287	34.946	36.059	36.852
HJB	29.959	32.585	34.363	35.557	36.451
MHL	27.08	29.214	30.632	31.578	32.247
HY	26.026	28.274	29.815	30.807	31.659
YF	25.292	27.421	28.863	29.844	30.554
SJ	24.549	25.971	26.919	27.561	28.002
XC	24.324	25.727	26.631	27.213	27.615
WS	19.516	21.618	23.059	24.04	24.742
XZ	16.825	18.402	19.523	20.33	20.936

结合表 1 的计算结果分析: 在基于潮流算法的计算方式下, 改变感应电动机负荷所占的比重, 短路电流也随之发生改变; 其次, 不计及感应电动机负荷时的短路电流比占比 50% 的比重下的短路电流相差有 3~7 kA, 而对于未列举出来的 220 kV 变电站母线, 其短路电流前后也相差 1~9 kA。这一差异的主要原因是计算得到的短路电流中包含部分感应电动机提供的短路电流。

3.1.2 PSDE-SCCP 基于潮流算法的不同负荷模型

基于潮流算法的短路计算结果比较精确。电压值取故障前的实际运行电压, 充分考虑负荷、并联无功补偿、线路充电功率、线路和变压器电阻及考虑柔性直流输电系统(目前还在测试阶段)。该方式下的短路电流值与 PSASP 结果类似, 也都随着感应电动机负荷比重的增加而逐渐增大。如表 2 所示为 PSDE-SCCP 程序在基于潮流算法的精确计算下的短路电流值。

结合表 2 的计算结果分析: 短路电流值在计及感应电动机负荷的情况下与完全忽略感应电动机负荷相差 3~10 kA, 因此, 建立合适的电网负荷模型,

减少与实际电网的差异, 对短路电流的计算结果有着重要的影响, 有助于对电网的规划设计。

表 2 PSDE-SCCP 基于潮流的短路电流结果

Table 2 Results of short circuit current based on flow (PSDE-SCCP)

母线名	不同感应电动机负荷比重下的短路电流值/kA				
	0%	25%	50%	75%	100%
YX	39.25	43.567	46.378	48.264	49.61
MS	35.907	39.85	42.428	44.164	45.406
NC	35.859	40.118	42.94	44.865	46.259
FZ	34.964	38.56	40.924	42.532	43.696
LF	30.137	34.112	36.805	38.677	40.049
YT	32.654	35.937	38.113	39.607	40.692
LP	31.795	35.226	37.531	39.133	40.309
JX	31.58	34.825	36.948	38.386	39.424
FZD	31.274	33.806	35.433	36.519	37.295
HJB	30.122	32.787	34.526	35.707	36.558
MHL	27.288	29.457	30.84	31.759	32.41
HY	26.154	28.434	29.942	30.98	31.737
YF	25.421	27.579	28.985	29.938	30.629
SJ	24.947	26.408	27.344	27.974	28.428
XC	24.412	25.834	26.711	27.274	27.664
WS	19.596	21.719	23.119	24.067	24.747
XZ	16.874	18.479	19.585	20.376	20.97

3.2 基于方案计算

基于方案算法的短路计算不依赖潮流计算的结果, 属于一种对短路电流估算的方法, 计算中的电网结构及正、负、零序参数均来自于所基于的方案。同样以某省电网为例, 在基于方案算法条件下, 采用不同的设置方式进行短路计算, 通过对计算结果的比较分析找出 PSASP 及 PSDE-SCCP 基于方案算法的短路计算特点。

3.2.1 PSASP 基于方案的不同算法模型

结合 2.1 节所述, PSASP 依据对计算条件的选择, 有 5 种设置方式, 不同的设置方式下短路电流的计算结果有一定的差异。以某省 500 kV 电网为例, 具体计算结果如表 3 所示。

结合表 3 做出如图 1 所示部分母线在不同设置条件下短路电流的情况。在 5 种设置中, 设置 5 与设置 3 采用的条件基本一致, 图 1 中短路电流结果也比较相近, 而其他不同的设置方式下的短路电流值有着明显的差别。其中, 设置 3 与其他设置方式的最大差别在于其考虑了负荷模型的影响, 且可调节电压系数 c ; 设置 4 采用了理想电压源, 取额定值的 1.1 倍, 因而等效电压值相对较高, 这也是计算短路电流值最大的原因之一。

表 3 PSASP 基于方案不同设置条件下的短路电流结果

Table 3 Results of short circuit current of PSASP
based on different scheme settings

母线名	不同设置条件下的短路电流结果/kA				
	设置 1	设置 2	设置 3	设置 4	设置 5
YX	48.422	43.799	46.493	50.987	46.928
MS	47.469	42.563	44.898	48.909	45.317
NC	43.235	39.269	42.319	46.516	42.751
FZ	41.533	38.098	39.984	44.38	40.333
LF	38.926	35.301	37.434	41.541	37.816
YT	37.897	34.798	37	41.819	37.333
LP	36.974	33.814	36.331	40.114	36.692
JX	37.951	34.327	36.159	39.579	36.48
FZD	37.048	33.739	34.566	37.948	34.802
HJB	35.028	32.02	33.496	37.56	33.76
MHL	33.332	29.938	30.385	32.843	30.589
HY	30.423	27.576	28.913	31.26	29.149
YF	30.727	27.551	28.241	30.377	28.451
SJ	29.212	26.552	26.538	28.979	26.675
XC	30.218	26.727	26.347	27.868	26.475
WS	24.949	22.535	23.107	26.019	23.294
XZ	19.875	17.881	18.9	20.708	19.078

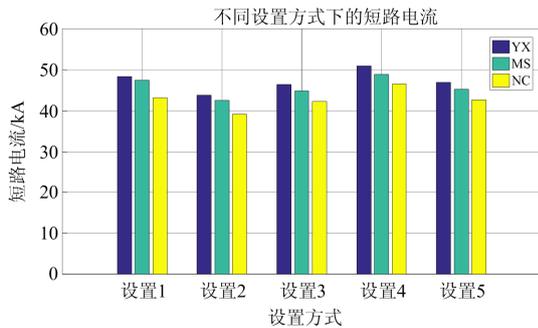


图 1 PSASP 不同设置方式下短路电流结果图

Fig. 1 Results of short circuit current in different settings of PSASP

3.2.2 PSDE-SCCP 基于方案的不同算法模型

在基于方案算法条件下, PSDE-SCCP 也可根据对计算条件的选择, 分成 5 种短路计算方式^[22], 结合 2.2 节所述, 以某省 500 kV 电网为例, 采用不同设置方式进行短路计算, 具体结果如表 4 所示。

根据表 4 得到图 2 所示的部分变电站母线不同设置条件下的短路电流情况。不同设置方式下的主要差别在于设置条件的选择及电压系数 c 取值的不同。在上述设置方式中, 考虑感应电动机负荷是设置 4、设置 5 与其他 3 种设置方式之间最大的差别。

表 4 PSDE-SCCP 基于方案不同设置条件下的短路电流结果

Table 4 Results of short circuit current of PSDE-SCCP
based on different scheme settings

母线名	不同设置条件下的短路电流结果/kA				
	设置 1	设置 2	设置 3	设置 4	设置 5
YX	42.449	42.287	44.55	52.76	48.714
MS	41.349	41.152	43.4	51.08	46.818
NC	37.903	37.874	39.77	47.85	44.283
FZ	36.762	36.422	38.56	45.2	41.733
LF	33.849	33.395	35.56	42.41	38.597
YT	33.658	33.569	35.3	41.61	38.706
LP	32.697	32.615	34.29	40.91	38.017
JX	33.064	32.969	34.7	40.81	37.825
FZD	32.582	32.364	34.17	38.83	36.114
HJB	30.958	30.887	32.47	37.56	35.054
MHL	28.671	28.585	30.08	34.1	31.782
HY	26.618	26.645	27.92	32.33	30.252
YF	26.475	26.343	27.78	31.76	29.519
SJ	25.467	25.451	26.71	29.53	27.732
XC	25.621	25.587	26.87	29.45	27.629
WS	21.538	21.171	22.63	26.19	24.027
XZ	17.247	17.249	18.09	21.22	19.791

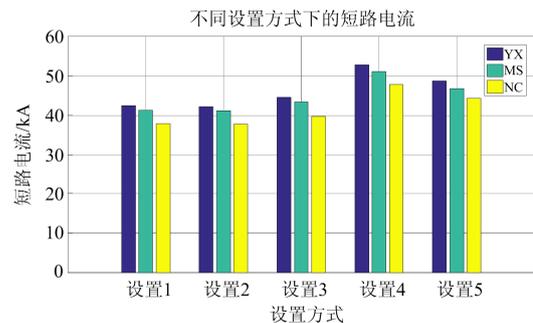


图 2 PSDE-SCCP 不同设置方式下短路电流结果图

Fig. 2 Results of short circuit current in different settings of PSDE-SCCP

结合图 2 分析可知, 在基本条件一致的情况下, 考虑感应电动机负荷比不考虑感应电动机负荷的情况下得到的短路电流值普遍高出 2.5~8.5 kA 左右。设置 2 考虑静态负荷, 但在计算中处理为恒阻抗, 而例子中的实际电网的负荷模型种类主要是恒阻抗负荷(占比 50%)与感应电动机负荷(占比 50%), 因此设置 2 得到的短路电流与其他忽略负荷的设置方式得到的短路电流差异不大。其次, 关于电压系数 c , 仅 IEC60909 计算条件下的设置 3 与设置 4 的电压系数 c 取 1.1, 其余设置方式下的电压系数通常取值为 1.05。从设置 3、设置 4 与其他设置条件下的短路电流的计算结果对比分析, 电压系数 c 对短路电流

的影响相较于负荷模型种类及比重对短路电流的影响较小,但在一定程度也会影响短路结果,与章节 1 中对短路计算影响因素的分析基本一致。

3.3 两种算法比较

对于 PSASP 的两种算法,结合上述的计算结果分析,在数据条件基本一致的情况下,基于潮流与基于方案两种算法得到的短路电流值之间存在较大的差异。基于方案算法条件下,由于无功补偿装置等的影响,等效的电压源普遍高于正常运行下的值,因而计算得到的短路电流值普遍高于基于潮流算法。同时,电力网络在进行规划运行时,要在实际电网发生故障时预判准确且保有一定的裕度,因此,对短路电流的计算研究多处于最严重的情况下,即将发电机组全部开启,而基于潮流算法通常是根据电压水平进行合适的机组开机安排,达到合理的潮流优化,包含一定的人为影响,这些也是造成两种算法下差异较大的原因。从负荷的角度分析,基于方案相比于基于潮流的短路计算条件通常忽略了负荷对阻抗的影响,这也是引起基于潮流的计算结果偏低的原因。根据计算结果的分析,两算法下的短路电流差异最大可达到 10 kA,最小也有 2 kA 左右。

PSDE-SCCP 的短路计算,采用基于潮流与基于方案算法的计算结果存在差异的主要原因在于电压 U_k 的取值,基于方案算法条件下,等效电压源 U_k 取默认值 $1.05U_N$,而基于潮流算法条件下的 U_k 为实际潮流计算中的电压值。其次,基于潮流算法条件下的短路计算并未考虑机组的开机状况,而基于方案的计算条件显示全开机的状态,使得短路电流水平普遍高于基于潮流的计算结果。

4 仿真计算

在对两个软件进行分析比较时,以某省规划中的电网为例,如图 3 所示,为该省部分电网拓扑图,图中箭头所示的方向即为潮流走向。

结合图 3 分析,该省电网潮流基本走向为“东电西送”的格局,东部有剩余电力外送,西部、南部、北部基本本地消纳,而中部地区 220 kV 线路潮流方向总体为东西相对。其次,特高压在该省中部落点,其潮流在消化当地负荷后向西南输送。在特高压接入后,电气距离缩短,电磁环网形成,使得等值联络阻抗变小,进而导致短路电流水平急剧上升,因此,随着特高压进程的加快,该省电网急需通过分析研究短路电流水平进行规划,而在对短路电流进行计算分析时,选用合适的设置条件比较重要。

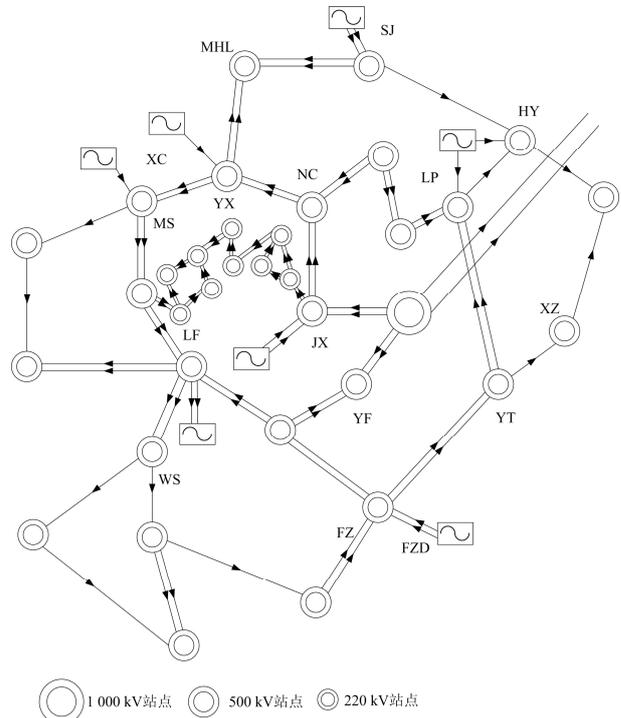


图 3 某省规划电网拓扑图

Fig. 3 Grid planning topology of a region

4.1 基于潮流的仿真结果

对于两个软件的使用,主要有基于潮流及基于方案两种计算方法,结合某省的实际规划数据,采用不同的负荷模型比例,对 500 kV 电压等级的短路电流进行计算,并比较差异。如图 4 为基于潮流的短路计算结果。

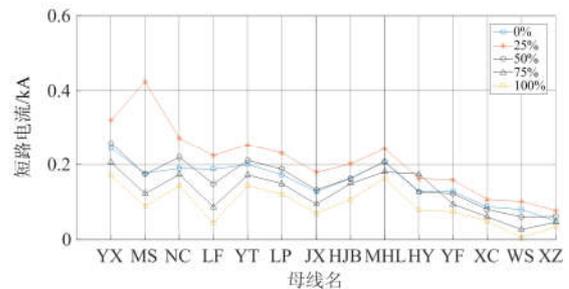


图 4 500 kV 基于潮流算法下不同负荷比例的短路电流差值

Fig. 4 500 kV short circuit current difference of different load ratio based on flow

从图 4 可以看出,差值(PSDE-SCCP 的短路值减去 PSASP 得到)多为大于零的,即基于潮流算法条件下的 PSDE-SCCP 计算得到的短路电流普遍高于 PSASP 软件,在两软件采用的方法一致,基本原理及条件基本一致的情况下,说明 PSDE-SCCP 软件计算得到的节点电压幅值普遍较高。此时的潮流计算下的节点电压对短路电流的结果的影响比重较

大^[23]。同时, 结合 220 kV 基于潮流的短路电流计算结果, 对两软件之间的差异进行分析, 具体如图 5 所示。

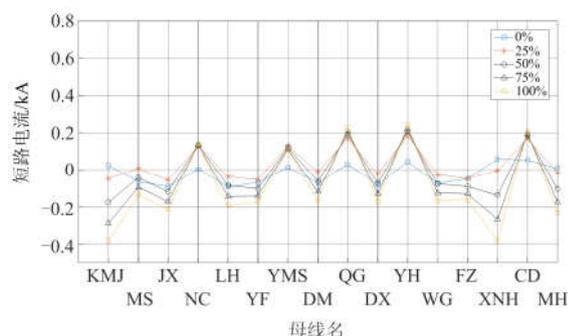


图 5 220 kV 基于潮流算法下不同负荷比例的短路电流差值
Fig. 5 220 kV short circuit current difference of different load ratio based on flow

由于计算中的负荷多集中在 220 kV 站点, 此时在两软件的计算条件一致的情况下, 对短路电流结果影响较大的是对负荷的处理。

从上述整体结果分析, 两个软件在基于潮流算法条件下的短路结果差异较小, 基本处于 0.2 kA 左右, 可初步认为在该方式下的短路电流计算结果基本一致。但随着电网规模的不断扩大以及特高压的接入, 在发生短路故障时, 各发电机的出力情况和系统电压水平之间的调节是否合理难以得到很好的保证, 且保证潮流优化吻合实际电网的运行情况更是困难, 潮流优化程度受经验限制较多。因此, 在电网规划阶段, 不易选用基于潮流算法的计算结果作为事故预判的估计值, 但可作为规划中的网架校验, 对电网的实际运行仅作为参考。

4.2 基于方案的仿真结果

结合实际电网的运行情况分析, 某省电网的实际负荷主要有恒阻抗及感应电动机负荷占比各 50% 的比例组成, 对于电厂负荷, 其感应电动机负荷占比 65%。而在软件的应用中, PSASP 设置 1, 设置 2 及设置 4 均不考虑负荷的影响, 这对于短路电流的计算结果有着很大的影响, 有碍于电网规划时的安全裕量的确定, 因此, 在实际计算中, 推荐使用设置 3(考虑国家电网安全稳定计算技术规范条件)与设置 5(自定义条件)。就计算相对精确程度而言, 同时为更贴适于 PSDE-SCCP 的设置条件, 采用设置 5 相对较好: 系统全开机, 计及感应电动机负荷, 同时改变感应电动机所占比例等, 对短路电流进行计算。其部分结果如表 5 所示。

表 5 自定义条件下不同负荷比重下的短路电流结果

Table 5 Short circuit current results under different loads (based on custom condition)

母线名	不同感应电动机负荷比重下的短路电流值/kA				
	0%	25%	50%	75%	100%
YX	42.786	46.297	48.754	50.479	51.747
MS	41.429	44.754	47.089	48.732	49.94
NC	38.339	41.864	44.371	46.158	47.489
FZ	36.953	39.851	41.919	43.394	44.493
LF	34	37.029	39.254	40.868	42.085
YT	34.028	36.804	38.785	40.198	41.251
LP	33.026	35.969	38.088	39.615	40.761
JX	33.342	36.024	37.915	39.255	40.249
FZD	32.805	34.825	36.243	37.237	37.969
HJB	31.291	33.534	35.116	36.232	37.057
MHL	28.98	30.693	31.873	32.695	33.296
HY	26.961	28.924	30.318	31.237	32.055
YF	26.591	28.37	29.62	30.508	31.171
SJ	25.907	27.038	27.831	28.39	28.805
XC	25.788	26.898	27.642	28.144	28.503
WS	21.663	23.12	24.232	25.026	25.614
XZ	17.376	18.786	19.821	20.585	21.172

PSDE-SCCP 软件在基于方案算法条件下, 不同设置方式下计算得到的短路电流有较大的差别, 并且这些基本的计算条件基本都不考虑感应电动机负荷, 而在该省实际规划的网架结构中, 感应电动机负荷占比为 50%及以上。就 IEC60909 计算条件, 考虑感应电动机负荷比不考虑的情况下短路电流结果普遍高出 2.5~8.5 kA 左右, 而其他的计算条件基本不考虑负荷的影响。因而在电网的规划计算阶段, 不宜采用这些计算条件。

在对短路电流进行计算规划时, 较好的方式是采用设置 5, 即自定义条件, 计及负荷、线路及变压器的电阻, 同时考虑并联无功补偿等条件, 对短路电流进行计算。其不同感应电动机负荷比重下的部分短路电流结果如表 6 所示。

利用 PSASP 与 PSDE-SCCP 两个软件对短路电流进行计算时, 从表 5、表 6 中的数据可以看出, 不同的负荷模型比重对短路电流的结果影响较大。因此, 要建立合理的负荷模型, 缩小与实际电网的差异, 有利于对电网的规划及预测。同时, 结合 PSASP 与 PSDE-SCCP 两软件基于方案对短路电流计算的分析, 对本文提出的自定义条件下的短路电流的差异具体如图 6 所示。

表 6 自定义条件下不同负荷比重下的短路电流结果

Table 6 Short circuit current results under different loads based on custom condition

母线名	不同感应电动机负荷比重下的短路电流值/kA				
	0%	25%	50%	75%	100%
YX	42.903	46.647	49.128	50.848	52.106
MS	41.699	45.24	47.589	49.22	50.414
NC	38.336	42.027	44.594	46.373	47.693
FZ	36.86	39.951	42.023	43.481	44.564
LF	33.742	37.028	39.281	40.893	42.102
YT	33.998	36.925	38.901	40.295	41.329
LP	32.996	36.091	38.208	39.719	40.848
JX	33.335	36.168	38.061	39.387	40.369
FZD	32.74	34.904	36.322	37.304	38.024
HJB	31.267	33.635	35.21	36.311	37.121
MHL	28.884	30.721	31.92	32.746	33.347
HY	26.915	28.982	30.372	31.355	32.084
YF	26.554	28.426	29.672	30.547	31.198
SJ	25.76	27.003	27.821	28.392	28.814
XC	25.829	27.011	27.756	28.253	28.607
WS	21.361	23.066	24.208	25.007	25.594
XZ	17.366	18.834	19.865	20.621	21.199

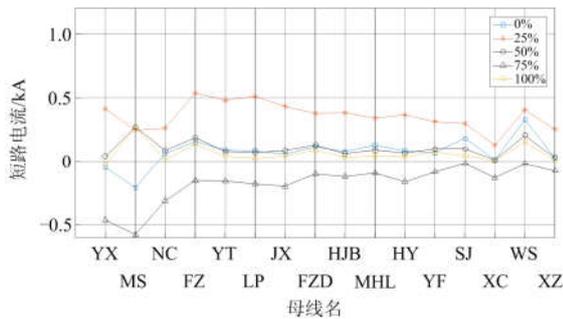


图 6 500 kV 基于方案下不同负荷比例的电流差值

Fig. 6 500 kV based on the current difference of different load ratios under the scheme

从图 6 分析可得：在不计及负荷或负荷完全是感应电动机负荷的情况下，采用相同的条件设置，得到的短路电流的结果差值基本在 0 kA 左右。针对该地区规划的负荷情况(50%的感应电动机负荷)，两个软件计算得到的短路电流差值浮动的范围基本在 0.1 kA 以内。在电网的规划阶段，通常会选择受外界影响较小的基于方案算法条件进行短路电流的研究计算，因此，对本文提出的设置方式结合 220 kV 的系统进一步对两个软件进行计算验证，证实了该设置方式的有效性。具体的差异分布如图 7 所示，图中为部分 220 kV 母线。

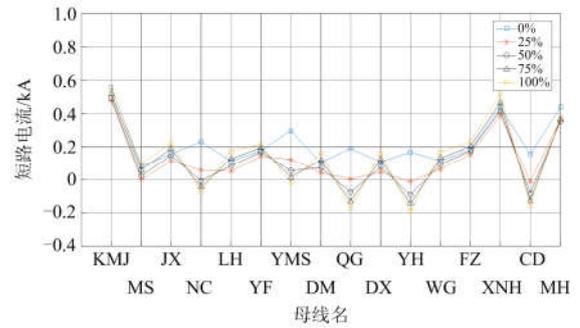


图 7 220 kV 基于方案下不同负荷比例的电流差值

Fig. 7 220 kV based on the current difference of different load ratios under the scheme

结合图 7 分析可得，在自定义条件下，两个软件计算得到的 220 kV 站点短路电流结果差异基本在 0.2 kA 左右。验证了本文提出的缩小两软件短路电流计算差异的设置方案，并充分考虑了实际电网中的负荷影响。

根据上述结果分析，在电网规划阶段，可选用人为干预较少的基于方案算法，其短路计算结果更能较为客观的反映电网各节点短路情况。为尽可能的缩小两软件计算结果的差异，使其对电网规划决策的影响降到最低，较好的方式是采用基于方案中的自定义的设置条件。从基于方案算法条件下分析，采用自定义的设置条件，其中两软件所采用的设置条件相同，并选取相同的电压系数。使其在不同负荷比例模型下的实际电网计算结果的差异仍将会大大缩小，有效避免了因软件差异而出现的预测规划结果不统一的问题。

5 结论

针对当前 PSASP 及 PSDE-SCCP 软件电网短路计算存在的差异性，着重对这两类软件在短路电流计算方面的计算条件设置及算法的分析比较，并对提出的设置标准进行分析验证，主要结论如下：

(1) 基于潮流的计算条件下，两软件的计算原理相同，计算结果差异较小，可认为结论基本一致。

(2) 感应电动机负荷所占比重越高，则无论何种算法下得到的短路电流都有所升高。因此，建立准确的负荷模型，缩小与实际电网运行的差异，有利于对短路结果的预测与分析，进而确定合适的断路器型号。

(3) 基于方案算法条件下，两软件不同设置的计算结果都存在一定的差异。在依据两软件短路结果进行相应的决策规划时，建议采用自定义的计算条

件, 选用相同的条件设置初值, 计及负荷、线路和变压器电阻等的影响。

随着特高压的接入, 大电网之间的互联程度越来越紧密, 导致短路电流越限越来越严重。如何使短路计算结果指导电网规划发挥有效的作用, 规范计算数据的使用及条件的设置很有必要。其次, 在未来电网的发展中, 越来越多新装置、新设备的接入, 给短路计算分析带来新的问题还有待研究。

参考文献

- [1] 艾琳, 冯艳虹, 陈为化, 等. 特高压接入京津冀北 500 kV 电网短路电流问题及限流措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 133-137.
AI Lin, FENG Yanhong, CHEN Weihua, et al. Research on short-circuit current problem and limiting measures caused by UHV substation connecting to 500 kV network in Beijing-Tianjin Area and Northern Hebei[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 133-137.
- [2] 周明, 曹炜, 陈文涛, 等. 串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 147-153.
ZHOU Ming, CAO Yi, CHEN Wentao, et al. Study on influence of series reactor on power system short-circuit current characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 147-153.
- [3] 郑少鹏, 钟显, 孙谊娟, 等. ± 1100 kV 特高压直流接入后短路电流分析及限制措施研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 18-24.
ZHENG Shaopeng, ZHONG Xian, SUN Yiqian, et al. Research of short-circuit current analysis and its limiting measures after ± 1100 kV UHVDC connected to grid[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 18-24.
- [4] 章勇高, 廖赟, 苏永春, 等. 特高压交直流接入对江西电网短路电流的影响研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(10): 34-39.
ZHANG Yonggao, LIAO Yun, SU Yongchun, et al. Study on the effect of AC / DC UHV on short-circuit current in Jiangxi power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(10): 34-39.
- [5] LIU J, HAO X, WANG X, et al. Application of thyristor controlled phase shifting transformer excitation impedance switching control to suppress short-circuit fault current level[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2018, 4(1): 1-12.
- [6] 张曼, 施超, 许文超, 等. 基于 PSD-SCCP 与 PSASP 的短路电流计算研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 88-93.
ZHANG Man, SHI Chao, XU Wenchao, et al. Research on calculation of short-circuit current based on PSD-SCCP and PSASP[J]. Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 88-93.
- [7] 叶圣永, 程超, 唐权, 等. 基于 BPA 的短路电流计算模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 138-143.
YE Shengyong, CHENG Chao, TANG Quan, et al. Research on calculation mode of short-circuit current based on BPA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 138-143.
- [8] 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. Short-circuit current calculation standard for East China power grid[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 74-78.
- [9] 黄彦浩, 施浩波, 安宁. IEC60909 标准与 PSASP 短路计算的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 69-74.
HUANG Yanhao, SHI Haobo, AN Ning. Comparison research on the calculation of short-circuit currents of IEC60909 and PSASP short-circuit module[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 69-74.
- [10] 姚淑玲, 田华. 基于 BPA 和 PSASP 程序的短路电流计算比对[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 112-115.
YAO Shuling, TIAN Hua. A comparison between BPA and PSASP software programs for calculating short-circuit currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 112-115.
- [11] 董红. 短路电流计算模式的选择[J]. 广东电力, 2013, 26(12): 53-55, 119.
DONG Hong. Selection for calculation mode for short circuit current[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(12): 53-55, 119.
- [12] 王晓蔚, 石振刚, 杨潇, 等. 基于 PSASP 的短路计算分析[J]. 电气传动自动化, 2010, 32(2): 57-60.
WANG Xiaowei, SHI Zhengang, YANG Xiao, et al. Analysis of short circuit calculation based on PSASP[J]. Electric Drive Automation, 2010, 32(2): 57-60.
- [13] 田华, 王卿, 朱峰, 等. 基于 PSASP 程序的短路电流计算结果分析比较探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 56-60, 65.
TIAN Hua, WANG Qing, ZHU Feng, et al. Comparative study of short-circuit current calculation results based on PSASP software[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 56-60, 65.

- [14] 罗路平. BPA 与 PSASP 在江西电网短路计算中的差异研究[C] // 江西省电机工程学会, 2016 年江西省电机工程学会年会论文集(《江西电力》2016 年 11 月增刊), 江西省电机工程学会, 2016: 28-29, 46.
LUO Luping. Study on the difference between BPA and PSASP in the short-circuit calculation of Jiangxi power grid[C] // Institute of Electrical Engineering in Jiangxi Province. Jiangxi Institute of Electrical Engineering in 2016 Conference Proceedings (Jiangxi Electric Power Supplement in November 2016), Institute of Electrical Engineering, Jiangxi Province, 2016: 28-29, 46.
- [15] LI C X, ZHANG M L, SHI Z. Study on the influence of short-circuit current calculation for Liaoning Power Grid by using different grid equivalent methods[J]. Northeast Electric Power Technology, 2016, 37(7): 1-4, 28.
- [16] 林金娇, 刘观起, 杨金刚, 等. 地区电网不同元件模型下短路电流计算的比较[J]. 华北电力技术, 2013(9): 6-9+25.
LIN Jinjiao, LIU Guanqi, YANG Jingang, et al. Comparison of short-circuit current calculation under different elements model for regional Power Grid[J]. North China Electric Power, 2013(9): 6-9, 25.
- [17] 刘楠, 张彦涛, 秦晓辉, 等. 感应电动机负荷对短路电流影响机理研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 187-192.
LIU Nan, ZHANG Yantao, QIN Xiaohui, et al. Impact of load induction motor power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 187-192.
- [18] 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 Shiyong, et al. Influences of load models on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 144-149.
- [19] 李勇, 于芮枝, 王英英, 等. 负荷对短路电流的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 40-45.
LI Yong, YU Ruiji, WANG Yingying, et al. Research on the influence of load on short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 40-45.
- [20] 朱峥, 李帅虎, 李一泉, 等. 在线短路电流计算精确等效模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(1): 42-46, 52.
ZHU Zheng, LI Shuaihu, LI Yiquan, et al. A study on accurate equivalent model of short circuit current calculation[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(1): 42-46, 52.
- [21] 闫宇星, 王晓虎. 基于自定义模式的 PSASP 与 PSS/E 数据模型转换与仿真对比[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 87-93.
YAN Yuxing, WANG Xiaohu. Data model conversion from PSASP to PSS/E based on custom mode and simulation comparison[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 87-93.
- [22] YANG Y, YUAN Y B, WANG H X, et al. The cumulative effect analysis of the short-circuit current of the key equipment in power systems based on the batch operations of PSD-BPA software[C] // International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), October 17-18, 2015, Beijing, China: 1-6.
- [23] YAN C Y, WANG M, LU J J. The contrast between the models' in PSD-BPA and those in PSASP[J]. Advanced Materials Research, 2013, 614-615: 1055-1064.

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-08-20

作者简介:

章勇高(1975—), 男, 副教授, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用、新能源发电系统; E-mail: z.y.gao_1@163.com

李小蓓(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统短路计算; E-mail: 981016450@qq.com

方华亮(1977—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统控制与通信。E-mail: hlfang@whu.edu.cn

(编辑 姜新丽)