

基于 BPA 的短路电流计算模式研究

叶圣永, 程超, 唐权, 戴松灵, 朱国俊

(国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要: BPA程序应用于计算短路电流时采取不同的计算方法、计算模式, 将导致结果存在较大差异, 影响电网规划决策。结合国内现行的短路电流计算标准, 分析了在不同计算方法中对节点运行电压的不同假定, 以及不同计算模式下线路充电功率和负荷模型构建的区别, 讨论了由此引起的短路阻抗、短路电流计算差异。以新英格兰10机39节点改进测试系统和四川电网2020年规划网架进行三相短路电流仿真研究, 分析比较基于BPA的不同计算方法、计算模式下短路电流值, 提出了理论分析结果, 建议了适合四川电网规划的短路电流计算模式。

关键词: BPA; 短路电流; 计算模式

Research on calculation mode of short-circuit current based on BPA

YE Shengyong, CHENG Chao, TANG Quan, DAI Songling, ZHU Guojun

(State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: BPA short-circuit current calculation software is widely used in China, however, with the same source data its calculation result differs under different calculation conditions or with different methods and thus affects power grid planning and decision-making. With consideration of current calculation standards for short-circuit current, different assumptions for node operating voltage in different calculation methods are analyzed, the differences of line charging power and load model construction with different calculation modes are analyzed, and the resulting differences of short circuit impedance and current calculation are discussed. Using improved New England 39 bus system and Sichuan power grid planning architecture in 2020 as examples, short-circuit current calculation results under different calculation conditions and with different methods based on BPA are compared to verify the variation of the theoretical analysis. Finally, some suggestions for the choice of short-circuit current standards are made.

Key words: BPA; short-circuit current; calculation model

中图分类号: TM 71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)18-0138-06

0 引言

在特高压电网建设和全国联网的背景下, 随着电力需求的快速增长, 新能源迅速开发, 送受端电网联系越来越密集, 电网短路电流水平超标问题日益成为电网运行最突出的问题之一^[1-4]。短路电流计算是电力系统规划、设计、运行必须进行的一项工作, 如果短路电流计算结果偏于保守, 可能造成不必要的投资浪费。相反, 计算结果偏于乐观, 则会给系统运行留下安全隐患。

在进行短路电流计算时, 规划、设计及运行部门采用的计算标准、计算程序、计算方法、数据模型及计算模式不同, 可能造成短路电流计算结论和超标判断的差异, 计算结果的差异会导致短路电流限制措施不同和决策困难^[5-7]。本文采用的中国版

BPA 短路电流计算程序(PSD-SCCPC)广泛应用于国内电网规划、设计、运行部门及科研单位^[8-10]。考虑到短路电流的理论计算值与实际值存在着差异, 理论计算应保留一定的裕度。对于开关遮断容量为 50 kA 的站点, 短路电流理论计算值的控制目标为不超过 48 kA^[11]。

本文在介绍适用于电力系统短路电流计算的标准的基础上, 比较了标准之间的差异, 分析了基于中国版 BPA 短路电流的计算模式, 并通过对新英格兰 39 节点改进测试系统和四川电网 2020 年规划电网的计算分析, 提出了简单实用、结果较为准确的适用于工程应用的计算模式。

1 短路电流计算标准

目前我国电力系统并没有统一的短路电流计

算标准, 常见的短路电流计算标准有以下几种。

(1) 国际标准: 包括国际电工委员会制定的 IEC 60906 和美国国家标准学会及电气和电子工程师协会制定的 ANSI 标准^[12-13];

(2) 国家标准: 1996 年颁布实施的《三相交流系统短路电流计算》;

(3) 行业标准: 1995 年颁布实施的《220~500 kV 电网继电保护装置运行整定规程》、2013 年颁布实施的《电力系统安全稳定计算技术规范》;

(4) 企业标准: 《国家电网安全稳定计算技术规范》。

上述标准对等效电压源、负荷模型、线路电容和无功补偿等处理存在一定的差异。

(1) 等效电压源: IEC 60909 和国家标准引入电压系数, 电压源取 1.1 倍的额定电压; ANSI 标准等效电压源一般选为标幺值 1.0; 行业标准将发电机电动势取标幺值为 1 后计算出等效电压源; 企业标准取正常运行方式可能达到的最高电压, 各电网根据实际情况确定。

(2) 负荷模型: IEC 60909 和 ANSI 标准忽略负荷的影响, 但通过一系列的修正系数保证了结果的合理性; 国家标准考虑负荷影响; 行业标准忽略负荷影响; 企业标准考虑负荷影响, 等值感应电动机负荷比例应与实际情况相符, 电动机负荷参数应慎重选择。

(3) 线路电容: IEC 60909、国家标准及相关行业标准忽略线路电容影响, 企业标准考虑线路电容。

(4) 无功补偿: IEC 60909、国家标准及相关行业标准忽略无功补偿影响, 企业标准也仅考虑线路高抗。

2 BPA 短路电流计算模式分析

BPA 短路电流计算通常分为基于潮流(或精确计算条件)和基于网架(或方案)两种基本方法。

2.1 基于潮流(或精确计算条件)方法

基于潮流的短路电流计算方法, 详细模拟发电机、线路、变压器、负荷等元件, 得到精确的正序短路电流 $\dot{I} = \dot{U}_{f0} / Z_{eq}$, 其中 \dot{U}_{f0} 为故障前故障点的实际运行电压, Z_{eq} 为故障点等值短路阻抗, $Z_{eq} = Z_{eq1} + Z_{eq2}$, 其中 Z_{eq1} 为故障点等值正序阻抗, Z_{eq2} 为各种短路故障下的附加阻抗。

按是否计及线路充电功率、静态负荷和马达负荷, 有 5 种计算模式:

(1) 考虑静态负荷、马达负荷和线路充电功率(模式一);

(2) 不考虑静态负荷、马达负荷和线路充电功率

(模式二);

(3) 仅考虑静态负荷(模式三);

(4) 考虑静态负荷和马达负荷(模式四);

(5) 仅考虑线路充电功率(模式五)。

2.2 基于网架(或方案)方法

由于电力系统运行状态千变万化, 系统运行电压变化时系统阻抗同时在变, 导致短路电流的变化趋势并不与系统运行电压变化完全一致^[14], 很难在电网的不同点找到造成最大短路电流的特定潮流分布。

上述各类标准均推荐基于网架的短路电流计算方法, 该方法在网架结构、发电机安排以及负荷水平相同的条件下, 短路电流计算结果基本相同。

基于网架同上有 5 种计算模式: 考虑静态负荷、马达负荷和线路充电功率(模式一); 不考虑静态负荷、马达负荷和线路充电功率(模式二); 仅考虑静态负荷(模式三); 考虑静态负荷和马达负荷(模式四); 仅考虑线路充电功率(模式五)。

2.3 不同模式对短路电流计算的影响

以图 1 所示发电机、变压器、线路所构成的简单系统为例, 分析线路充电功率、静态负荷模型、马达负荷模型对短路电流计算结果的影响。不考虑线路充电功率、静态负荷和马达负荷模型时, 图 2 为图 1 的等效电路图。

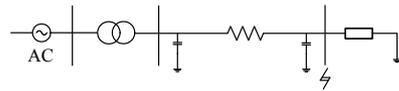


图 1 简单电力系统

Fig. 1 Simple power system

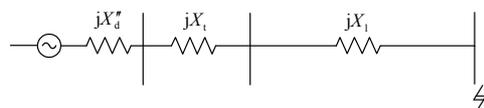


图 2 简单系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram

此时短路点等值阻抗

$$Z_{eq0} = X_d'' + X_1 + X_1 \quad (1)$$

2.3.1 线路充电功率的影响

仅考虑故障侧的线路充电功率时, 图 1 的等效电路图如图 3。

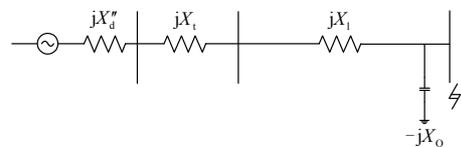


图 3 考虑线路充电功率的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit diagram considering the line capacitive charging power

故障点处的短路等值阻抗^[15]

$$Z_{eq1} = j(X_d'' + X_t + X_l) // (-jX_Q) \quad (2)$$

将 Z_{eq1} 的幅值与 Z_{eq0} 进行比较:

$$\begin{aligned} |Z_{eq1}| &= |(X_d'' + X_t + X_l) // (-X_Q)| = \\ &= \left| \frac{X_Q(X_d'' + X_t + X_l)}{X_d'' + X_t + X_l - X_Q} \right| > \\ &= \left| \frac{X_Q(X_d'' + X_t + X_l) - (X_d'' + X_t + X_l)^2}{X_d'' + X_t + X_l - X_Q} \right| = \\ &= \left| \frac{(X_d'' + X_t + X_l)(X_d'' + X_t + X_l - X_Q)}{X_d'' + X_t + X_l - X_Q} \right| = \\ &= |X_d'' + X_t + X_l| = |Z_{eq0}| \end{aligned} \quad (3)$$

可知计及故障侧的线路充电功率时, 短路等值

$$\begin{aligned} |Z_{eq2}| &= |j(X_d'' + X_t + X_l) // (R + jX)| = \left| \frac{(X_d'' + X_t + X_l)(R + jX)}{j(X_d'' + X_t + X_l) + R + jX} \right| = \\ &= \frac{|R(X_d'' + X_t + X_l) + jX(X_d'' + X_t + X_l)|}{|j(X_d'' + X_t + X_l) + R + jX|} < \frac{|R(X_d'' + X_t + X_l) + jX(X_d'' + X_t + X_l) + (X_d'' + X_t + X_l)^2|}{|j(X_d'' + X_t + X_l) + R + jX|} = \\ &= \frac{|[j(X_d'' + X_t + X_l) + R + jX](X_d'' + X_t + X_l)|}{|j(X_d'' + X_t + X_l) + R + jX|} = |X_d'' + X_t + X_l| = |Z_{eq0}| \end{aligned} \quad (5)$$

可知计及静态负荷时, 短路等值阻抗幅值减小, 短路电流增大。

2.3.3 马达负荷的影响

计及静态负荷和马达负荷模型时, 图 1 的等效电路图如图 5。

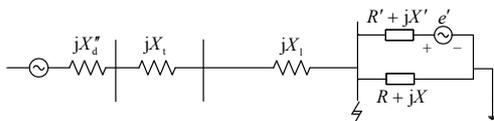


图 5 考虑马达负荷的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit diagram considering the motor load

对于马达负荷, 在短路瞬间及其后续短暂的暂态过程中, 可等效为带有内电抗的衰减电势源^[16]。如果其端电压大于其内电势, 此时动态负荷起分流作用; 如果其端电压小于其内电势, 此时动态负荷对短路点电流起增流作用, 直到内电势衰减到端电压以下, 负荷电流重新起分流作用。短路暂态过程中, 动态负荷端电压越低, 其增流作用越明显^[17]。

3 算例分析

3.1 计算条件

(1) 计算软件及版本: PSD-SCCP 短路电流计算程序 V2.1.7。

阻抗幅值增大, 短路电流减小。

2.3.2 静态负荷的影响

仅考虑静态负荷模型时, 图 1 的等效电路图如图 4。

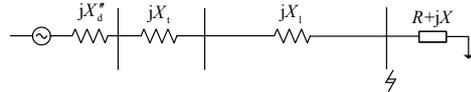


图 4 考虑静态负荷的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit diagram considering the static load

故障点处的短路等值阻抗^[15]

$$Z_{eq2} = j(X_d'' + X_t + X_l) // (R + jX) \quad (4)$$

将 Z_{eq2} 的幅值与 Z_{eq0} 进行比较:

(2) 模式设置

精确计算条件下和经典假设计算条件下, 通过设置是否计及静态负荷、马达负荷和线路充电功率, 分别进行 5 种模式的计算, 分别为考虑静态负荷、马达负荷和线路充电功率(模式一); 不考虑静态负荷、马达负荷和线路充电功率(模式二); 仅考虑静态负荷(模式三); 考虑静态负荷和马达负荷(模式四); 仅考虑线路充电功率(模式五)。

3.2 新英格兰 39 节点改进测试系统

新英格兰 10 机 39 节点典型电力系统的单线结构如图 6 所示。这个系统由 10 台发电机、39 条母线和 46 条线路组成, 代表美国新英格兰州的一个 345 kV 电力网络, 其中 39 号母线上的发电机是一个等值机, 代表了与这个系统相连的加拿大部分的电力网络。系统基准功率为 100 MVA, 基准电压为 345 kV^[18]。

潮流数据中, 根据节点出力水平, 将发电机节点拆分为单机容量 175~600 MVA 不等的机组, 其中火电机组占 20%, 水电机组占 80%, 根据机组类型、装机容量, 并构建发电机的稳定模型, 考虑暂态、次暂态参数。

负荷模型中, 静态负荷含恒阻抗负荷 60%, 恒功率负荷 40%。考虑马达负荷时, 马达负荷模型比例为 40%^[19]。

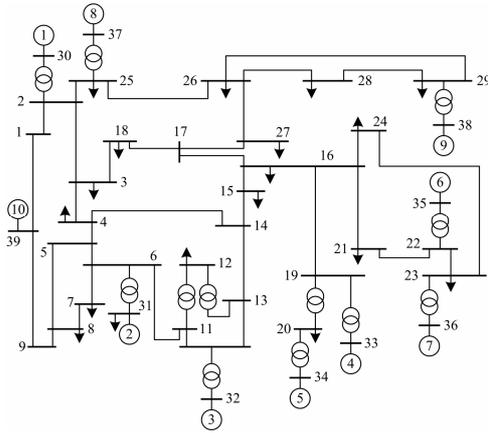


图 6 新英格兰 39 母线系统

Fig. 6 New England 39 bus test system

短路电流计算结果如表 1、表 2 所示。新英格兰 39 母线改进测试系统中, 同一模式、不同计算条件下短路电流计算结果差值在 0.3~1.5 kA; 同一计算条件、不同模式下, 模式四短路电流计算值最大, 模式五最小, 差值分布在 1.2~10.6 kA, 考虑静态负荷短路电流增大 1.8%~12.5%, 考虑马达负荷短路电流增大 2.3%~17.7%, 考虑线路充电功率短路电流减小 0.9%~4.3%。

表 1 39 母线系统三相短路电流对比(基于潮流)

Table 1 Comparison of short-circuit current for New England 39 bus test system (based on flow)

| 母线名称 | 基于潮流的短路电流计算结果/kA | | | | |
|--------|------------------|------|------|------|------|
| | 模式一 | 模式二 | 模式三 | 模式四 | 模式五 |
| bus-5 | 43.5 | 34.9 | 39.0 | 44.3 | 33.7 |
| bus-8 | 37.0 | 28.9 | 32.5 | 37.6 | 28.0 |
| bus-15 | 39.1 | 31.6 | 35.0 | 39.8 | 30.6 |
| bus-24 | 39.6 | 32.6 | 35.1 | 40.2 | 31.7 |
| bus-27 | 30.6 | 25.9 | 27.9 | 31.5 | 24.8 |
| bus-36 | 22.8 | 21.9 | 22.4 | 22.9 | 21.7 |

表 2 39 母线系统三相短路电流对比(基于网架)

Table 2 Comparison of short-circuit current for New England 39 bus test system (based on grid)

| 母线名称 | 基于网架的短路电流计算结果/kA | | | | |
|--------|------------------|------|------|------|------|
| | 模式一 | 模式二 | 模式三 | 模式四 | 模式五 |
| bus-5 | 44.6 | 35.9 | 39.8 | 45.4 | 34.8 |
| bus-8 | 38.4 | 30.1 | 33.6 | 39.1 | 29.2 |
| bus-15 | 40.5 | 32.9 | 36.1 | 41.2 | 31.9 |
| bus-24 | 40.5 | 33.5 | 35.8 | 41.1 | 32.5 |
| bus-27 | 31.1 | 26.3 | 28.2 | 31.9 | 25.2 |
| bus-36 | 23.3 | 22.4 | 22.8 | 23.4 | 22.2 |

结果表明, 对于运行方式简单的新英格兰 39 母线系统计算条件对结果影响较小, 计算模式对结果影响较大。负荷节点受是否考虑静态负荷、马达负荷因素影响较大, 汇集线路较多的母线短路电流

计算结果受是否考虑线路充电功率因素影响较大。

3.3 四川 2020 年规划电网

2020 年四川电网如图 7 所示, 通过 4 回 1 000 kV 交流特高压线路、4 回 500 kV 交流线路与重庆电网联网。通过 7 回直流与西北电网、华东电网、华中电网联网, 其中: 德阳-宝鸡±500 kV 直流, 丰期送电规模 1.5 GW, 枯期受电 3 GW; 向家坝-上海±800 kV 特高压直流, 丰期送电规模 6.4 GW, 枯期送电规模 3.2 GW; 溪洛渡左-浙西±800 kV 特高压直流, 丰期送电规模 8 GW, 枯期送电规模 4 GW; 锦屏-苏南±800 kV 特高压直流, 丰期送电规模 7.2 GW, 枯期送电规模 3.6 GW; 准东-成都±1 100 kV 特高压直流, 丰期受电规模 6 GW, 枯期受电规模 12 GW; 白鹤滩-湖北±800 kV 特高压直流, 丰、枯期送电规模 4 GW; 乌东德-温州±800 kV 特高压直流, 丰期送电规模 8 GW, 枯期送电规模 4 GW^[20-21]。

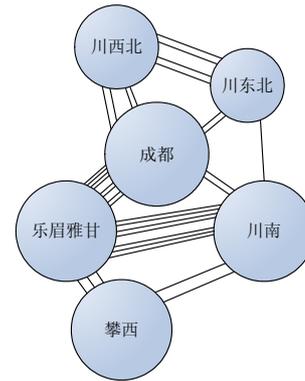


图 7 四川 2020 年 500 kV 规划电网示意

Fig. 7 Sketch of Sichuan 500 kV power grid in 2020

四川电网采用两种计算方法、5 种计算模式分别计算, 对比结果如表 3、表 4 所示。

四川 2020 年规划电网算例中, 发电机出力方式多、负荷水平波动大, 所以计算条件对结果影响较大, 同一模式、不同计算条件下短路电流计算结果差值在 0.1~9.8 kA。基于潮流的计算结果中, 模式四短路电流计算值最大, 模式五最小, 差值分布在 5~17.6 kA, 考虑马达负荷短路电流增大 4.3%~30.9%, 考虑静态负荷短路电流增大 1.9%~11.6%, 考虑线路充电功率短路电流减小 2.1%~9.6%; 基于网架的计算结果中, 模式四短路电流计算值最大, 模式五最小, 差值分布在 3.8~13.2 kA, 考虑马达负荷短路电流增大 2.7%~24.2%, 考虑静态负荷短路电流增大 1.2%~8.1%, 考虑线路充电功率短路电流减小 1.5%~6.7%。

结果表明, SC-XLD、SC-XJB 等发电厂母线短路电流受计算条件影响较大, SC-SZ、SC-XD 等位于负荷中心区域母线短路电流计算结果受是否考虑

静态负荷、马达负荷因素影响较大,而 CD-MD 等汇集线路较多的母线短路电流计算结果受是否考虑线路充电功率因素影响较大。

表 3 四川电网部分母线三相短路电流对比(基于潮流)
Table 3 Comparison of short-circuit current for Sichuan power grid (based on flow)

| 母线名称 | 电压等级 | 基于潮流的短路电流计算结果/kA | | | | |
|--------|------|------------------|------|------|------|------|
| | | 模式一 | 模式二 | 模式三 | 模式四 | 模式五 |
| SC-XD | 230 | 47.4 | 33.7 | 37.6 | 48.0 | 32.5 |
| SC-LZ | 230 | 46.3 | 37.2 | 39.5 | 46.9 | 36.3 |
| SC-HG | 230 | 47.3 | 39.2 | 41.3 | 48.0 | 38.1 |
| SC-GQ | 230 | 47.1 | 39.6 | 42.1 | 47.8 | 38.6 |
| SC-SZ | 230 | 51.1 | 38.6 | 43 | 51.8 | 37.1 |
| PZH-XF | 230 | 51.3 | 41.1 | 44.3 | 52.1 | 40.1 |
| SC-MYN | 230 | 52.9 | 42.7 | 45.8 | 54.0 | 40.8 |
| SC-JZ | 230 | 53.9 | 47.7 | 49.3 | 54.5 | 46.7 |
| SC-XLD | 525 | 48.6 | 47.1 | 48 | 50.0 | 45.2 |
| SC-XJB | 525 | 51.0 | 49.4 | 50.4 | 52.5 | 47.5 |
| CD-MD | 525 | 59.9 | 50.1 | 55.4 | 62.9 | 45.3 |

表 4 四川电网部分母线三相短路电流对比(基于网架)
Table 4 Comparison of short-circuit current for Sichuan power grid (based on grid)

| 母线名称 | 电压等级 | 基于网架的短路电流计算结果/kA | | | | |
|--------|------|------------------|------|------|------|------|
| | | 模式一 | 模式二 | 模式三 | 模式四 | 模式五 |
| SC-XD | 230 | 50.4 | 38.5 | 41.6 | 50.9 | 37.7 |
| SC-LZ | 230 | 52.0 | 43.6 | 45.6 | 52.6 | 42.9 |
| SC-HG | 230 | 49.0 | 41.8 | 43.5 | 49.6 | 41.0 |
| SC-GQ | 230 | 48.8 | 42.4 | 44.5 | 49.5 | 41.5 |
| SC-SZ | 230 | 52.3 | 41.7 | 45.1 | 53.0 | 40.6 |
| PZH-XF | 230 | 53.9 | 44.7 | 47.6 | 54.7 | 43.8 |
| SC-MYN | 230 | 54.2 | 45.5 | 47.9 | 55.1 | 44 |
| SC-JZ | 230 | 53.5 | 47.6 | 49.1 | 54.1 | 46.9 |
| SC-XLD | 525 | 57.3 | 56.3 | 57 | 58.5 | 54.9 |
| SC-XJB | 525 | 59.8 | 58.8 | 59.5 | 61.1 | 57.3 |
| CD-MD | 525 | 63.3 | 56.5 | 60 | 65.9 | 52.7 |

3.4 结果分析

通过对以上算例比较分析,对同一套源数据进行不同的短路电流计算条件、计算模式设置,计算结果差别超出正常计算误差范围,将影响到开关选择及网架的建设方案比选。

基于潮流的短路电流计算结果看似更加接近实际值,然而全系统的所有故障点的短路前电压并不能保证是系统可能的最高运行电压,发电机的实际功率因数也不一定能反映发电机的最大负载情况,计算结果具有较大的不确定性;基于网架的短路电流计算结果独立于电网运行状态,不受节点运行电压影响,具有可操作性及一致性。

计算条件相同情况下,同时考虑静态负荷、马达负荷模式短路电流计算结果最大,只考虑静态负

荷模式计算结果次之,只考虑线路充电功率模式计算结果最小,三种因素全部纳入考虑和均不考虑的计算模式结果分别为第三、第四。其中三种因素均不考虑的模式计算结果能够恰当体现电网结构、电源负荷分布引起的短路电流分布不均,计算结果较为合理,适用于四川电网规划中的短路电流计算分析。

4 结论

本文研究了基于中国版 BPA 的两种计算方法、五种计算模式的短路电流计算,分析了不同计算模式的差异。在新英格兰 39 母线改进测试系统和四川 2020 年规划电网上仿真研究了不同计算模式的短路电流计算,提出不考虑线路充电功率、静态和马达负荷模型的计算模式可应用于四川电网规划的短路电流计算。

参考文献

- [1] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
RUAN Qiantu. Present situation of short-circuit current control in SHANGHAI power grid and countermeasures [J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 78-83.
- [2] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.
YUAN Juan, LIU Wenyong, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.
- [3] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [4] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [5] 张勇, 王云辉, 沈建涛, 等. 输电网短路电流计算[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 40-42.
ZHANG Yong, WANG Yunhui, SHEN Jiantao, et al. Research of short-circuit current calculation in transmission network[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 40-42.
- [6] 王焯, 闫奇, 戴志辉, 等. 零序电流保护运行风险评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 16-20.
WANG Chao, YAN Qi, DAI Zhihui, et al. Operational risk evaluation model of zero sequence current protection[J]. Power System Protection and Control,

- 2012, 40(5): 16-20.
- [7] 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.
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.
- [8] 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.
- [9] 张永康, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 限制 500 kV 电网短路电流的网架调整优化算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 34-39.
ZHANG Yongkang, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. An optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV power grid by adjusting power grid configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 34-39.
- [10] 李勇, 姚文峰, 杨柳, 等. 南方电网主网架热稳定和短路电流超标问题分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 21-25.
LI Yong, YAO Wenfeng, YANG Liu, et al. Analysis on the problems of thermal stability and standard-exceed short circuit current in the CSG main grid[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(2): 21-25.
- [11] 杨雄平, 李力, 李扬絮, 等. 限制广东 500 kV 电网短路电流运行方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 104-107.
YANG Xiongping, LI Li, LI Yangxu, et al. Running programs of limiting 500 kV short-circuit current in Guangdong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 104-107.
- [12] 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.
- [13] 王寓, 王主丁, 张宗益, 等. 国内外常用短路电流计算标准和方法的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 148-158.
WANG Yu, WANG Zhuding, ZHANG Zongyi, et al. Comparison and research on the commonly used standards and methods of short-circuit current calculation [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 148-158.
- [14] 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.
- [15] 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.
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.
- [16] 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 on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 187-192.
- [17] 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 Shiying, et al. Influences of load models on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 144-149.
- [18] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989: 223-227.
- [19] 曹炜, 王伟汤, 刘蓓, 等. 受端电网负荷动态特性与三相短路电流相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 61-65.
CAO Wei, WANG Weitang, LIU Bei, et al. Analysis on relativity between load dynamics and three-phase short-circuit current of receiving-end power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 61-65.
- [20] 叶圣永, 王云玲, 唐权, 等. ± 1100 kV “疆电入川” 特高压直流输电对四川电网安全稳定影响[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2726-2731.
YE Shengyong, WANG Yunling, TANG Quan, et al. Impact of ± 1100 kV UHVDC power transmission project from Xinjiang to Sichuan on security and stability of Sichuan power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2726-2731.
- [21] 陈虎, 张英敏, 贺洋, 等. 特高压交流对四川电网多送出直流输电系统影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 136-141.
CHEN Hu, ZHANG Yingmin, HE Yang, et al. Impact assessment of UHVAC on multi-send HVDC systems of Sichuan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 136-141.

收稿日期: 2014-11-14; 修回日期: 2015-01-27

作者简介:

叶圣永(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电力系统稳定与控制; E-mail: yeshengyong410@126.com

程超(1983-), 女, 工程师, 研究方向为电力系统规划、电力系统稳定与控制;

唐权(1982-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电力系统稳定与控制。

(编辑 魏小丽)