

# 750 ~ 220 kV 系统短路电流影响 因素分析与限制措施

胡立锦<sup>1,2</sup>, 常喜强<sup>3</sup>, 周茂<sup>1</sup>, 夏时宇<sup>1</sup>, 张新燕<sup>2</sup>, 姚秀萍<sup>3</sup>

(1. 重庆电力公司建设分公司, 重庆 410021; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;  
3. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 随着电网规模和容量的明显提升, 电网短路电流水平不断提高, 高一级电压等级出现后, 次一级电网短路电流又会明显增大, 这对电网规划提出了更高的技术和经济要求。在分析电网负荷、接地支路和变压器变比等不同元件以及不同调压方式等因素对短路电流影响程度的基础上, 针对某地区实际 750 kV 电网布局, 考虑不同因素对短路电流的影响程度, 提出基于运行方式调整和故障电流限制器等不同手段相结合的短路电流抑制措施, 并通过仿真计算来检验措施的正确性和有效性。仿真结果表明, 影响短路电流水平的因素较多, 限制短路电流的措施需综合考虑, 不能片面考虑。

**关键词:** 短路电流; 负荷; 非标准变比; 仿真计算; 电网规划

**Abstract:** With the significant improvement of the scale and capacity of power grid, the level of short-circuit current improves continuously. The lower grid would have a much larger short-circuit current after a higher voltage level occurs, so it sets a higher technical and economic requirement to the planning of power grid. The different elements such as grid load, grounding branches and transformation ratio etc. are analyzed as well as the influence of different voltage-regulating modes on short-circuit current. On this basis, aiming at the overall arrangement of an actual 750 kV grid and considering the influences of different factors on short-circuit current, the measures against short-circuit current are proposed based on the combination of operation mode adjustment and fault current limiter, whose validity and availability are verified by the simulation and calculation. The simulation results show that the influence factors of short-circuit current level must be considered comprehensively.

**Key words:** short-circuit current; load; non-standard transformation ratio; simulation and calculation; power grid planning

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0021-06

## 0 引言

近几年, 随着用电负荷的大幅度增长以及发电机组容量的增加, 电网规模和容量得到明显提升。随着电网规模和容量的不断增大, 母线短路电流也将不断上升, 同时又随着 750 kV 网架建设, 电网网架结构得到加强, 网内电气等值距离进一步缩短, 短路电流水平又明显加大, 部分短路电流超标, 更换大容量断路器将造成大量断路器更换, 运行设备更换将带来众多问题, 如何避免短路电流水平提高, 同时避免短路电流带来的技术或者经济上的麻烦, 给电网规划和运行提出了新的要求。

文献[3-5]研究了上海、西北等地电网短路电流控制的现状, 并针对不同电压等级电网给出相应

的改进措施。文献[1-2]研究了负荷结构、优化策略等对电网短路电流的影响程度, 并提出基于模糊理论等新算法的模型建立方法、优化策略选择及评价方式。文献[5-9]对不同电压等级电网的分区方式、电磁开环方案、网架结构调整等因素对短路电流的影响, 并提出相应的优化算法及调整方案, 对实际电网运行有较高的参考价值。文献[12-16]考虑了故障电流限制器等对短路电流的影响, 研究了变压器中性点加装小电抗接地等对短路电流的限制效果, 并通过电力系统仿真软件进行了建模仿真计算, 针对仿真结果和实际经验给出了较合理的在电网不同元件位置加装故障电流限制器的方法及注意事项。国内外针对短路电流的研究大多采取针对某一因素而忽略其他无关因素的方式, 结论措施也均基于特定研究条件下单方面考虑, 而就不同因素融

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767003, 50867004)

入同一电网,同时考虑不同因素对短路电流影响程度,最终基于这些影响因素将多种调整手段相结合,从而找到更有效更贴近实际运行的限流措施的研究较少。

以某区域实际 750 ~ 220 kV 超高压电网结构为研究对象,计算分析了短路电流水平,通过考虑不同电力系统元件、变压器非标准变比、不同电网运行方式、故障电流限制器等因素对短路电流的影响,通过分析不同因素的短路电流贡献度找到短路电流最为敏感的因素。在此基础上,提出基于运行方式调整和短路电流限制器等多种手段相结合的故障电流综合限制措施。最后,将设计方案运用到研究电网中进行仿真计算,结果证明考虑不同因素对短路电流的影响并针对其采取多种调整手段相结合限流效果较理想,并就电网规划等方面提出建设性意见。

### 1 短路电流计算理论分析

复杂电力系统中短路电流计算在满足工程准确等级要求的前提下,可以采用一些必要的假设条件,简化短路电流计算。假设条件一般如下。

(1) 短路前三相交流系统在对称状况下运行。

(2) 三相交流系统短路电流计算指的是在短路发生后的第一个周期内的短路电流周期分量的有效值,即次暂态短路电流的计算。

(3) 发电机的转子是对称的,即转子无论转到什么位置发电机的参数都保持不变。在此情况下,  $X''_d = X''_q$ ,可将同步发电机等值为一个含有内电抗为  $X''_d$  的简单电压源。

(4) 电气设备的参数不随电流大小的变化发生变化。

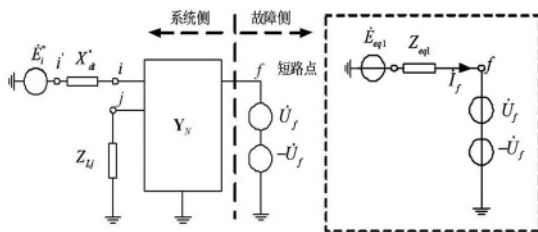


图1 发电机和负荷接入系统的等值电路图

三相短路的系统等值电路,如图1所示,其中系统中各发电机均可采用由次暂态电动势  $E''_i$  以及次暂态电抗  $X''_{di}$  组成的戴维南等值电路来表示。从故障点  $f$  向系统侧看的等值电路图可以等值简化为

如图1虚线框中所示,其中  $E''_{eq1}$  为短路故障点系统等值电动势,  $Z_{eq1}$  为短路故障点系统等值正序阻抗。

因为短路故障点等值电动势就是短路前的节点实际电压,即  $E''_{eq1} = U_f$ ,所以故障点  $f$  处的对称三相短路电流可以表示为

$$I_f = \frac{U_f}{Z_{eq1}} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,系统故障前各节点电压一定,那么故障电流大小实际由故障等值阻抗决定,即将系统中发电机阻抗(包括不经变压器直接和电网相连的发电机、经变压器同电网相连的发电机)、变压器阻抗(包括发电机侧变压器、网络中串联变压器)、线路阻抗等归算至故障点处。在实际的归算过程中,由于计算准确性的需要,通常需要根据不同的设备及设备位置按照有关标准规定对设备阻抗进行修正,其中发电机不经变压器直接与电网相连,在计算三相对称短路电流时,应按式(2)计算发电机的正序阻抗为

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX''_d) \quad (2)$$

$K_G$  为校正系数。

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{G_{max}}{1 + X''_d \sin \varphi_{rG}} \quad (3)$$

式中,  $G_{max}$  为电压系数;  $U_n$  为系统标称电压;  $U_{rG}$  为发电机额定电压;  $Z_{GK}$  为发电机校正阻抗;  $Z_G$  为发电机阻抗 ( $Z_G = R_G + jX''_d$ );  $X''_d$  为发电机超瞬态电抗;  $\varphi_{rG}$  为发电机额定电流  $I_{rG}$  与额定电压  $U_{rG}/\sqrt{3}$  间的相角。

带有有载调压变压器的发电机变压器组的阻抗按照式(4)修正为

$$Z_S = K_S (t_r^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (4)$$

修正系数  $K_S$  为

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} * \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} * \frac{C_{max}}{1 + |x''_d - x_T| \sin \varphi_{rG}} \quad (5)$$

式中,  $Z_S$  为发电机变压器组的校正阻抗;  $Z_G$  为无修正的发电机超瞬态阻抗 ( $Z_G = R_G + jX''_d$ );  $Z_{THV}$  为无修正的归算到高压侧的变压器短路阻抗;  $U_{nQ}$  为高压侧额定电压;  $x_T$  为变压器电抗(标么值);  $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$  为变压器额定变比。

与发电机变压器组中的变压器是不同的,网络中串联变压器其短路阻抗需要按照下面的经验公式进行修正。

$$Z_{T \cdot PSU} = K_T Z_T \quad (6)$$

其中修正系数  $K_T$  为

$$K_T = 0.95 \frac{C_{max}}{1 + 0.6X_T} \quad (7)$$

式中  $Z_{T \cdot PSU}$  为修正后变压器短路阻抗;  $Z_T$  为修正前变压器短路阻抗;  $K_T$  为串联变压器的修正系数;  $X_T$  为短路电抗。

## 2 短路电流计算方法的边界条件分析

某系统一次接线图如图2所示,其中母线1、2、3、4号电压等级为750 kV,其余5~16号母线电压等级为220 kV,通过在不同的条件下计算图中各母线处的短路电流来研究不同因素对短路电流的影响程度,从而寻找到能有效反映实际运行中短路电流变化情况的边界计算条件。

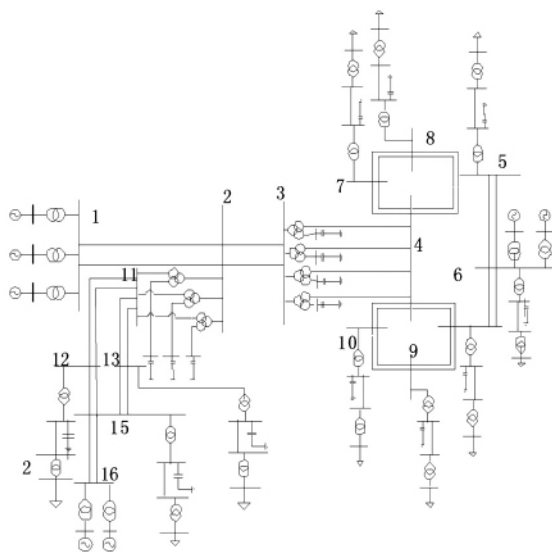


图2 某系统一次接线图

### 2.1 负荷、对地之路等对短路电流的影响

采用基于潮流的精确短路电流计算方法,按不同的方式计算所有220 kV及以上厂站的短路电流及短路阻抗:①考虑负荷;②忽略负荷;③考虑负荷接入等值上移至110 kV系统;④考虑负荷接入等值上移至220 kV系统;⑤忽略对地之路及并联补偿;⑥同时忽略负荷和对地之路及并联补偿,各母线节点短路电流变化曲线如图3所示。

由图3及计算结果可以看出,与基于潮流的精确短路电流方法相比,单一不考虑负荷或高抗时,各母线短路阻抗偏大,短路电流偏小,短路电流偏差值最大达到20%以上;负荷接入不同电压等级对短路

电流计算值影响不大;单一不考虑对地支路(高抗除外)时短路阻抗计算值偏小,短路电流偏大,短路电流最大偏差值达到14%。同时不考虑负荷与对地支路时短路电流计算结果既可能偏大,也可能偏小,但与精确短路电流计算结果很接近,最大偏差值仅为-4%。由此可见,计算短路电流时不能单一忽略某一电力元件,若要忽略建议同时忽略负荷、对地支路以及并联补偿对短路电流计算结果的影响。

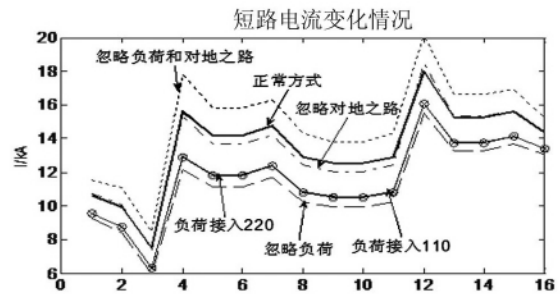


图3 忽略不同元件下的各点短路电流变化曲线

### 2.2 变压器非标准变比对短路电流的影响

图4为系统3号母线4台联络变压器高压侧不同非标准变比与标准变比下系统各母线节点短路电流变化曲线。

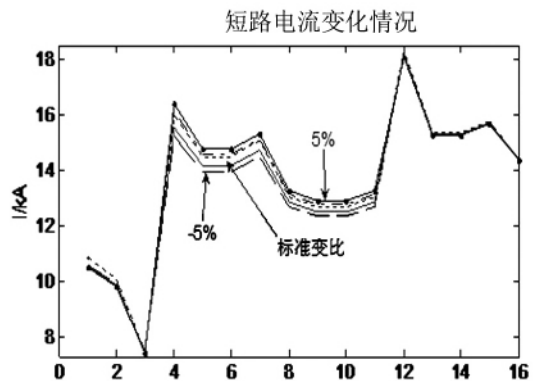


图4 非标准变比时短路电流变化曲线

不考虑联变非标准变比时,联络变压器750 kV侧与220 kV侧短路电流偏差方向不一致,而考虑变压器非标准变比时,由于变压器抽头变化时系统电压变化的作用,非标准变比不同引起系统短路电流的变化幅度要小于短路阻抗的变化幅度,且有时会出现短路电流与短路阻抗相同的变化趋势,故实际计算时可以忽略变压器非标准变比对计算的影响。

### 2.3 不同调压方式对短路电流的影响

计算不同电网调压方式下的各母线节点短路电流如图5所示:方式1为多投低容升高系统电压;方式2为提高机端电压升高系统电压;方式3为少投低容降低系统电压;方式4为降低机端电压降低系

统电压。

由于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一定与系统运行电压变化趋势完全一致，且电网运行电压变化引起的系统短路电流变化幅度较小。

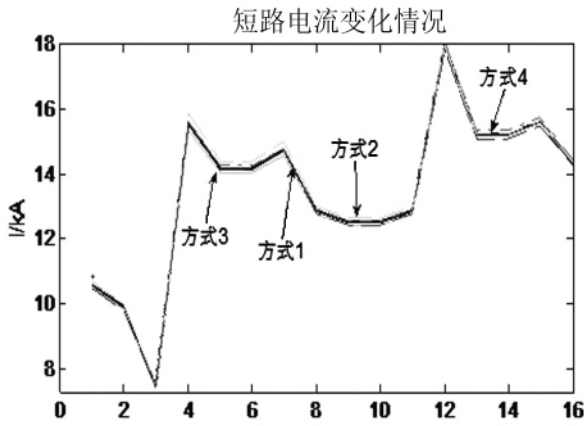


图5 不同运行方式时短路电流变化曲线

从上面的分析可得知：短路电流计算需认真搭建网架结构，深入分析短路电流的水平影响因素，特别是对于负荷等值，负荷中感应电动机的比例，对地支路中性点接地方式等等，以避免得出错误结果、错误判断。

通过研究短路电流计算时的边界条件发现，电网负荷的分布在一定程度上影响电网的短路电流，改善负荷结构或布局可以优化短路电流；对地支路对短路电流的影响较大，而变压器非标准变比和单纯的系统调压对短路电流的影响均较小，且趋势随多种因素改变。

### 3 基于运行方式调整和故障电流限制器的短路电流控制措施讨论

部分短路电流超标，更换大容量断路器将造成大量断路器更换，运行设备更换将带来众多问题。因此，为了更好地抑制短路电流，在上述研究的基础上提出基于运行方式调整和故障电流限制器的短路电流抑制措施，并通过实际电网仿真计算进行说明。

图6为某地区750~220 kV电网地理结构图，当750 kV变电站全部投运时，原有网架短路电流水平全线升高，部分节点超出或接近额定开断电流，为降低短路电流，考虑按以下两种方式进行调整。

#### (1) 系统网架结构 1

①750 kV 乌北变电站母联分列，220 kV 乌米

线、乌矸线、乌博(格达)双线以及乌彩双回降压运行线路接在乌北变电站220 kV I母，将220 kV 乌化双线、乌岗双线、乌康(康园)双线以及乌北2号主变压器连接在220 kV II母上。

②将乌鲁木齐城网转由凤凰主变压器接带，乌米线、八矸线、二化线断开。

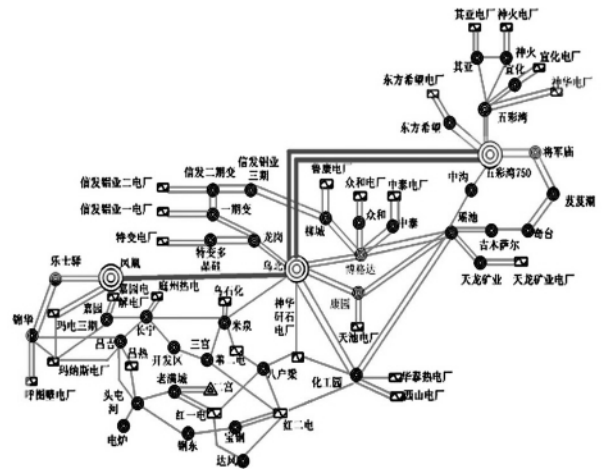


图6 某地区750 kV电网地理接线图

③乌北220 kV母联加装限流电抗器。

④乌北主变压器增加中性点小电抗。

按上述方案对电网进行仿真计算，得到短路电流变化曲线如图7所示，其中横坐标1~8分别表示母线节点：乌北变电站I号母、乌北变电站II号母、米泉、化工园I号母、化工园II号母、龙岗、博格达、五彩湾。

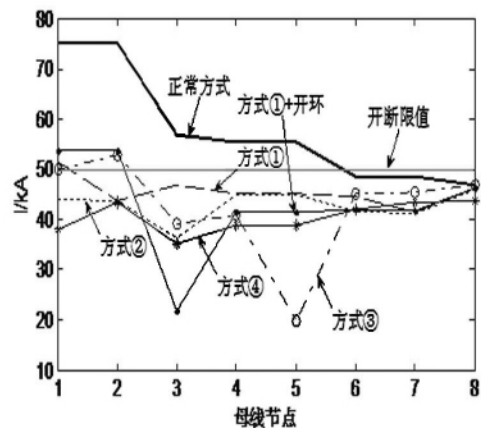


图7 网架1不同运行方式时短路电流变化曲线

对图7所示结果进行分析发现，750 kV变电站投运全线不调整时系统短路电流严重超标，220 kV 乌北、米泉、化工园分别达到额定开断电流的149.78%、141.95%、110.88%。若按①调整运行方式，各母线节点短路电流降至40 kA左右，降流效果较好，若开环矸化线，乌北220 kV母线短路电流超标而米泉短

路电流则大幅降低。若继续按②所述将主要负荷转移,可以大幅降低乌北米泉地区的短路电流。若按③所述乌北母联加装限流电抗器,能大幅降低乌北、化工园地区的短路电流,但需要重新调整母线接线方式使得双回共用一根母线,降低了供电可靠性。通过合理调整运行方式,各母线节点短路电流均降至开断限值范围内,按④所述乌北主变压器增设 $10\ \Omega$ 中性点小电抗后,乌北附近地区单相短路电流继续下降明显。由此可见,结合上述方案调整大幅降低了各母线节点的短路电流水平。

### (2) 系统网架结构 2

乌北—五彩湾升压运行。

①750 kV 乌北变电站母联分列,220 kV 乌米线、乌矸线、乌博(格达)双线接在乌北变电站220 kV I母,750 kV 乌彩双线、220 kV 乌化双线、乌岗双线、乌康(康园)双线以及乌北主变压器连接在220 kV II母。

②将乌昌城网转由凤凰主变压器接带,乌米线、八矸线、二化线断开。

③乌北220 kV母联加装限流电抗器。

④乌北主变压器增加中性点小电抗。

按上述方案对电网进行仿真计算,得到短路电流变化曲线如图8所示,其中横坐标1~8分别表示母线节点:乌北变电站I号母、乌北变II号母、米泉、化工园I号母、化工园II号母、龙岗、博格达、五彩湾。

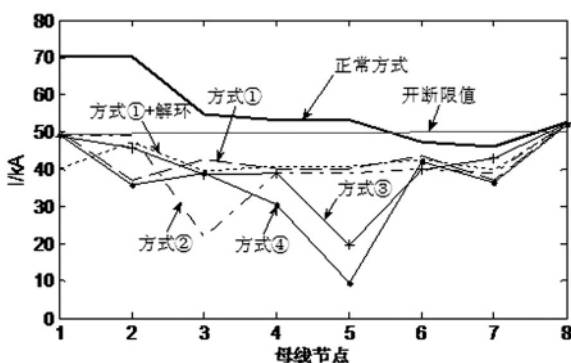


图8 网架2不同运行方式时短路电流变化曲线

上述方案可使乌北、米泉、化工园220 kV母线三相短路电流均满足要求,化工园、龙岗等地短路电流降幅最大,最低降至10 kA。其中,部分措施还需在乌北变电站中性点加装限流电抗器后方可将短路电流降至50 kA以下。乌北—五彩湾升压运行(乌彩750/220 kV电磁环网解环运行),由于大量电源接至五彩湾变电站220 kV侧,五彩湾变电站220 kV

母线短路电流升高5 kA左右,超过其220 kV断路器额定开断电流,上述方案都无法解决五彩湾变电站220 kV侧短路电流超标问题。

为降低五彩湾变电站220 kV侧短路电流,经计算:乌北—五彩湾升压运行(乌彩750/220 kV电磁环网解环运行)后,在接入五彩湾变电站的电厂(神火电厂、宜化电厂、东方希望电厂)升压变压器高压侧加装 $10\ \Omega$ 电抗后五彩湾变电站220 kV侧三相短路电流下降约4 kA,单相短路电流下降约5 kA。或者采取高阻抗变压器,提高升压变压器阻值可以降低短路电流水平,但对系统稳定性有一定的影响。同时在该地区电源直接升压接入750 kV电压等级后,系统短路电流又有所降低,相应地附加限流电抗器等随着网架结构的变化,对短路电流水平的限制作用减小。

通过上述分析可知,在限制短路电流水平时需远近结合,既要考虑对电网建设过渡方式,又要考虑最终方式,不能片面地依赖于电网运行方式的调整,(运行方式调整后降低了系统的稳定性,在一定程度上限制了输电能力,同时检修方式安排也存在一定的难度,不灵活等),也不能片面地加装限流电抗器,以避免在电网中增加过多的辅助设备如保护、计量等,导致在后期网架结构变化时限流作用降低,影响系统的稳定性,出现设备浪费。同时,对于电源接入审查时亦需综合分析。

## 4 结 论

电网结构加强的同时,电网布局、运行方式等的改变造成电网短路电流水平大幅提高,严重威胁到电网的安全稳定运行。部分短路电流超标,更换大容量断路器将造成大量断路器更换,运行设备更换会带来众多影响电网安全的问题。在研究短路电流理论的基础上,首先通过仿真分析研究了电网不同原件及电压控制方式等对短路电流的影响程度,然后结合某地区实际750~220 kV电网结构,提出了短路电流水平计算中应注意和综合考虑的事项,在正确评估短路电流水平后,通过统筹考虑运行方式调整和故障电流限制器的综合措施来抑制短路电流,并得出以下结论。

(1) 电网结构加强网架密集、新增电源增多,为了降低短路电流需要对电源接入的方式进行优化,

对于电厂采用高阻抗变压器、限流电抗器需综合考虑限制短路电流水平、电源送电能力、系统稳定水平、远近网架结合、过渡网架和最终网架统筹兼顾。

(2) 对于750 kV变电站升压运行后相配套的运行接线形式需综合考虑,除限制短路电流水平外,需考虑电网稳定性、输电能力,综合考虑配合措施。

(3) 限流电抗器对附近变电站母线短路电流降低效果十分显著,但单一依靠限流电抗器仍无法解决近区短路电流超标的问题,还需运行方式调整配合降流,同时与过渡方式、最终方式相结合。

(4) 通过对网架合理的分层、分区,适当解环运行可以有效地控制短路电流。

同时提出以下措施。

(1) 建议规划设计阶段,重点分析过渡年份短路电流水平,变电站的建设要考虑预留将来进行限制短路电流技术措施的空间。对枢纽变电站考虑双母线双分段方式,以便灵活调整运行方式,合理分配各母线出线。

(2) 避免在较小地区范围集中建设厂、站,对短路电流水平已经较高的地区,避免形成密集型小环网,必须形成的要对环网的短路电流水平做出评估,并对环网内部的短路阻抗作出一定的补偿提高,以降低短路电流升高的风险。

(3) 对于电源接入密集区,需综合考虑,既要保证送出能力,简化网架,同时也要满足短路电流水平,同时也需远期网架近期网架结合,加装限流设备也需综合评估。

十二五期间,西部地区将大量外送电力,形成大型电源接地电厂串珠接入系统,需综合考虑短路电流水平、电网输电能力、电网运行方式。需认真考虑发电厂的主接线形式、重要枢纽站的主接线形式、电厂升压变压器参数、电网网架结构。既要保证网架结构下限制短路电流水平的运行方式调整灵活、不降低供电可靠性和送电能力,又要满足短路电流水平。

#### 参考文献

[1] 王佳明,刘文颖,李群炬,等.基于多层次模糊综合评价模型的短路电流限制措施优化配置[J].电网技术,2011,35(11):125-129.  
[2] 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):145-149.

[3] 阮前途.上海电网短路电流控制的现状与对策[J].电网技术,1996,20(9):29-31.  
[4] 袁娟,刘文颖,董明齐.西北电网短路电流的限制措施[J].电网技术,2007,31(10):42-45.  
[5] 陈丽莉,黄民翔,张弘,等.电网限流措施的优化配置[J].电力系统自动化,2009,33(11):38-42.  
[6] Sarmiento H G, Castellanos R, Pampin G, et al. An Example in Controlling Short Circuit Levels in a Large Metropolitan Area [C]. Proceedings of 2003 Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003: 589-594.  
[7] 杨冬,刘玉田,牛新生.分区电网限流运行方式的综合决策方法[J].电力系统自动化,2010,34(12):34-38.  
[8] 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.  
[9] 叶华,刘玉田,牛新生.500~220 kV电磁环网开环方案模糊综合评价[J].电力自动化设备,2006,26(7):1-5.  
[10] 吴际舜.电力系统静态安全分析[M].上海:上海交通大学出版社,1985:17-35.  
[11] 夏道止.电力系统分析[M].北京:中国电力出版社,1995:3-8.  
[12] 武守远,荆平,戴朝波,等.故障电流限制技术及其新进展[J].电网技术,2008,32(24):23-32.  
[13] 金雪芬,戴朝波,武守远,等.故障电流限制器对继电保护的影响[J].电网技术,2010,34(6):98-105.  
[14] 孙树敏,刘洪顺,李庆民,等.电力系统故障限流器研究综述[J].电网技术,2008,32(21):75-79.  
[15] 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.  
[16] 朱天游.500 kV自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用[J].电网技术,1999,23(4):15-18.

作者简介:

胡立锦(1986),男,硕士,主要从事电力系统安全控制分析方面的研究;

常喜强(1978),男,高级工程师,主要从事电力系统安全稳定分析工作;

周茂(1977),男,高级工程师,研究方向为输变电规划与设计;

夏时宇(1978),男,高级工程师,研究方向为输变电规划与设计;

张新燕(1964),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为风力机控制、电气系统优化设计。

(收稿日期:2012-12-03)