

DOI: 10.7667/PSPC161653

## 750/330 kV 受端电网合理分区规模研究

张祥成<sup>1</sup>, 郭秋婷<sup>2</sup>, 潘艳<sup>2</sup>, 陶昕<sup>1</sup>, 张文朝<sup>2</sup>, 田旭<sup>1</sup>, 彭龙<sup>2</sup>

(1. 国网青海省电力公司经济技术研究院, 青海 西宁 810000; 2. 南京南瑞集团公司, 北京 102200)

**摘要:** 随着 330 kV 受端电网主变台数增加, 电网联系日益紧密, 西北电网 330 kV 母线短路电流水平逐年增高, 电网分区运行成为限制电网短路电流的重要措施。通过总结分析陕甘青地区典型的 750/330 kV 受端电网结构特点, 考虑主变台数、主变容量及站间距离长度等因素, 构建了单站独立供电、两站分区或三站链式分区的受端电网分区等值模型。通过分析典型分区模型短路电流水平及分区内主变负载率情况, 确定了分区内主变台数的上下限, 提出 750/330 kV 受端电网合理分区规模为 2~3 座 750 kV 变电站和约 4~6 台主变带一片 330 kV 电网。最后通过青海实际 750/330 kV 电网验证了所提 750/330 kV 受端电网分区规模的有效性。

**关键词:** 分区等值模型; 短路电流; 受端电网; 分区规模

### Study on the reasonable partition scale of 750/330 kV receiving-end power grid

ZHANG Xiangcheng<sup>1</sup>, GUO Qiuting<sup>2</sup>, PAN Yan<sup>2</sup>, TAO Xin<sup>1</sup>, ZHANG Wenchao<sup>2</sup>, TIAN Xu<sup>1</sup>, PENG Long<sup>2</sup>

(1. State Grid Qinghai Electric Power Company Economic Research Institute, Xining 810000, China;  
2. NARI Group Corporation, Beijing 102200, China)

**Abstract:** With the increasing of the number of main transformers, the 330 kV receiving-end power grid increasingly interconnected, the short-circuit current level of Northwest power grid increases year by year, the network partition becomes an important measure to limit the short-circuit current of the receiving-end power grid. Through the analysis of the characteristics of the summary in Shaanxi, Gansu and Qinghai region typical 750/330 kV receiving-end power grid and considering main transformer units, main transformer capacity and line length factors, this paper constructs the receiving-end grid zoning equivalent model for single station independent power supply, two-station partition or three-station chain partition. Through the analysis of short-circuit current level of typical partition model and main transformer load rate in partition, it determines the upper limit and lower limit of the partition of main transformer units, and proposes that 750/330 kV receiving end grid partition should be 2 to 3 seat 750 kV substation, about 4 to 6 main transformer with a piece of 330 kV power grid reasonable partition scale. Finally, through Qinghai actual 750/330 kV power grid, the effectiveness of the proposed 750/330 kV receiving-end grid partition scale is verified.

**Key words:** partition equivalent model; short-circuit current; receiving-end power grid; partition scale

## 0 引言

随着 330 kV 电网主变台数增加, 电网联系越来越紧密, 750/330 kV 受端电网短路电流水平超标问题日益突出, 直接威胁系统的安全和稳定运行。合理规划电网结构是控制短路电流的根本措施, 在高一级电网发展后打开高低压电磁环网, 实现低一级电压电网合理分区供电, 是目前优先推荐的一项经济有效的电网短路电流限制措施<sup>[1-4]</sup>。

文献[5]建立了以各 220 kV 电网分区的主变压器负载率均匀为目标函数的 220 kV 电网分区优化

模型, 以短路电流、供电可靠性及网损等为约束条件, 应用 Tabu 搜索算法进行分区优化求解。文献[6]在分析 500 kV 系统和地区电源提供的短路电流的基础上, 考虑分区受电能力, 提出了以一个 500 kV 站带一片 220 kV 分区电网的变压器配置原则及其与地区电源配置的关系。文献[7]以 500 kV 主变负载均衡为目标, 基于图论搜索及 Visual Studio 调用 PSASP 提出限制短路电流的电网自动分区算法。文献[8-9]构建了基于电路等效理论的单座、两座 750 kV 站分区等值模型, 提出 750/220 kV 电网分区以 2~3 台主变压器为宜的分区原则。文献[10-11]针对甘肃

中部 750/330 kV 电磁环网通过供电平衡、潮流分布和短路电流等技术经济比较, 得出分三片运行或两片运行均可的灵活运行方案。文献[12-14]分别以北京、天津和唐山地区 500/220 kV 电网为例, 具体分析了电网分区方案在实际电网中的应用情况。文献[15]在构建一组反映解环方案优劣的指标集的基础上提出了基于改进模糊层次分析法的电磁环网解环方案评估方法, 可较为全面、客观和科学地评价解环方案。现有研究大多针对西北某一实际电网提出分区方案及解环措施, 而对于西北 750/330 kV 受端电网的分区方法、分区原则及合理分区规模的研究相对较少。

本文通过总结分析西北 750/330 kV 受端电网的典型分区结构, 基于受端电网结构特点构建了多个典型分区供电模型, 在考虑分区内电源接入对短路电流水平的影响的基础上, 兼顾短路电流水平和供电可靠性, 提出了受端电网合理分区供电规模。最后, 对青海规划电网进行了短路电流水平和稳定性分析, 验证了分区规模在实际电网中的应用效果。

## 1 电网分区等值模型及短路电流水平

### 1.1 受端电网结构分析

分析青海、陕西和甘肃地区 750/330 kV 受端电网结构, 不考虑省间输送线路的情况, 以青海东部电网为例分析 750/330 kV 电磁环网结构、750 kV 站间距离长度及 750 kV 站内主变台数配置情况。青海东部电网 750 kV 线路多以双回线为主, 330 kV 线路多为单回线和双回线混合连接。

750 kV 站间距离最短的为日月山-西宁, 站间 750 kV 线路距离约 30 km, 330 kV 线路由两个通道连接, 通道长度约 40 km, 通道由单回线和双回线混合连接, 等值电气距离约为 15 km。站间距离最长为西宁北-江仓, 站间 750 kV 线路为双回线连接, 线路长度约 94 km, 330 kV 线路由两个通道连接, 通道长度约 125 km, 每个通道均由单回线和双回线混合连接, 等效电气距离约为 50 km。其余 750 kV 站间距离均介于上述距离之间。

西北各省受端电网 750 kV 变电站及站内主变配置情况如表 1 所示, 主变容量包括 1500 MVA 和 2100 MVA 两种, 除佑宁为四台主变并列运行外, 其余站多为每站两台或三台主变并列运行。

### 1.2 典型电网分区等值模型构建

通过分析青海、陕西和甘肃等地区 750/330 kV 受端电网结构特点, 根据 750 kV 站间连接方式及站内主变配置情况, 构建单站独立供电分区结构、两站分区结构和三站链式分区结构。等值模型中站间

表 1 西北各省 750 kV 站主变配置情况统计

Table 1 Statistical information of main transformer in northwest region 750 kV stations

受端电网	750 kV 变电站数	1500 MVA 主变台数	2100 MVA 主变台数
青海	6	11	5
陕西	7	0	12
甘肃	9	3	14

330 kV 线路距离取线路等值电气距离, 参照青海电网实际距离, 最短取日月山-西宁 15 km, 最长取西宁北-江仓 50 km, 计算范围为 15~50 km, 同时考虑一座变电站内有两台主变和三台主变并列运行两种情况。与之对应的系统短路电流计算模型如图 1—图 3 所示, 其中, 将分区以外的电网采用恒定电压源与系统等效阻抗串联的形式进行等值建模,  $X_s$  为 750 kV 系统等效短路阻抗。

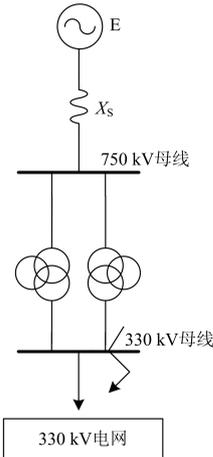


图 1 单站独立供电模型

Fig. 1 Single station independent power supply model

### 1.3 分区模型理论短路电流计算分析

750 kV 变电站的 330 kV 侧母线是分区电网的短路电流控制节点, 短路电流控制节点上的短路电流水平由 750 kV 系统通过主变下注的短路电流和接入 330 kV 分区电网的电源提供的短路电流共同决定。首先对各种分区结构下 750 kV 系统侧下注到 330 kV 母线的短路电流水平进行计算。根据西北电网实际情况, 主变容量主要考虑 1500 MVA 和 2100 MVA 两种, 短路阻抗标幺值  $U_k\%$  取 18%。对于单站独立供电模型, 考虑不同主变容量、主变台数, 750 kV 系统侧短路电流按 30~50 kA 考虑, 主变高压侧下注 330 kV 母线三相短路电流计算见式(1)。

$$I_{pu} = \frac{1}{X_s + \frac{X_T}{n}} \quad (1)$$

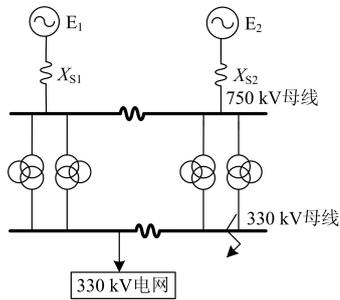


图2 两站分区模型

Fig. 2 Two-station partition model

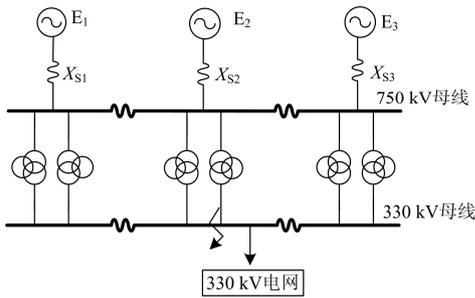


图3 三站链式分区模型

Fig. 3 Three-chain-station partition model

式(1)中:  $X_S$  表示 750 kV 系统等效短路阻抗;

表2 单座 750 kV 站不同容量主变不同台数并列运行时下注短路电流情况

Table 2 Pouring short-circuit current with different capacities and different quantities of transformers in one 750 kV substation

主变容量/MVA	750 kV 侧短路电流/kA	不同主变台数下 330 kV 侧短路电流/kA			
		1 台	2 台	3 台	4 台
1500	30	11.6	19.9	26.1	31.0
	40	12.1	21.4	28.8	34.8
	50	12.4	22.5	30.7	37.7
2100	30	15.2	25.0	31.8	36.8
	40	16.1	27.5	35.9	42.4
	50	16.7	29.2	38.9	46.7

表3 各分区模型不同主变容量不同线路长度下的短路电流水平

Table 3 Short-circuit current with different capacities and different length of lines in different partition models

站间等值电气 距离/km	分区 类型	主变容量/ MVA*台数	短路电流 /kA	分区 类型	主变容量/ MVA*台数	短路电流/kA	分区 类型	主变容量/ MVA*台数	短路电流/kA
50	两站 四变 分区	1500*4	28.8	两站 五变 分区	1500*5	36.2	三站 分区	1500*6	36.1
30		1500*4	31.4		1500*5	38.8		1500*6	41.4
15		1500*4	35.0		1500*5	42.4		1500*6	48.6
50		2100*4	35.4		2100*5	43.8		2100*6	43.4
30		2100*4	38.6		2100*5	47.0		2100*6	49.7
15		2100*4	43.3		2100*5	51.7		2100*6	59.1

#### 1.4 分区内电源提供短路电流情况

为保证供电可靠性, 分区内一般有一定容量的电源接入。为简化分析, 电源提供的短路电流采取叠加定理进行计算, 且认为电源直接接到 330 kV 母线短路点处。

$X_T$  表示系统基准下变压器短路阻抗;  $n$  为变电站内主变台数。表 2 列出了一座变电站不同容量主变不同台数并列运行时下注短路电流情况。

从表 2 计算结果可知, 不同台数和不同容量的主变并列运行时, 主变高压侧下注的三相短路电流最高为 46.7 kA。规划远景年份 330 kV 母线开关额定遮断电流取 63 kA, 因此短路电流水平均未超标。

针对两站四变、两站五变和三站链式分区模型短路电流水平进行计算, 750 kV 站间等值线路长度取 15~50 km, 750 kV 侧短路电流按 40 kA 考虑, 主变容量取 1500 MVA 和 2100 MVA 两种情况, 短路电流计算结果如表 3 所示。此外, 当 750 kV 侧短路电流为 30 kA 和 50 kA 时, 330 kV 母线三相短路电流比 750 kV 侧短路电流为 40 kA 时分别降低和提高约 1~2 kA。

对于三站 6 台主变分区模型, 当主变容量全部为 2100 MVA, 线路长度为 15 km 情况下, 短路电流最高达到 591 kA。实际中 750 kV 站的 330 kV 侧母线断路器额定遮断电流一般为 63 kA, 在不考虑分区内有电源接入的情况下短路电流水平临界断路器额定遮断电流。

假定接入 330 kV 电网的发电机容量为  $S_G$ , 升压变压器短路电抗百分比为  $U_k\%$  (基于自身容量), 分区内发电厂分别通过 20 km 双回线接入 750 kV 变电站的 330 kV 侧, 单位长度线路电抗标幺值为  $X_L=0.0003/\text{km}$ , 线路长度为  $L$ , 系统基准容量为  $S_B$ 。

则电厂通过 330 kV 线路提供的三相短路电流为

$$I_{G-330} = \frac{1}{\frac{(X_d'' + U_k) \times S_B}{S_G} + \frac{X_L \times L}{2}} \quad (2)$$

短路容量:  $S_{G330} = I_{G330} \times S_B$

假定发电机容量为 300 MW, 功率因数为 0.85,  $X_d''$  取 0.2,  $U_k$  取 0.18。经计算, 该发电机注入到 330 kV 母线的短路电流约 1.5 kA, 此时一台 300 MW 的发电机提供的短路容量  $S_{G330}$  为 892 MVA。结合前述等值分区模型, 750 kV 侧短路电流取 40 kA, 330 kV 站间等值距离取最短 15 km, 分区内允许接入电源的最大机组容量计算结果如表 4 所示。

表 4 各分区模型允许接入电源的机组容量

Table 4 Available capacity of generators in different partition models

分区模型	主变容量/MVA*	短路电流/kA	允许接入机组容量/MW
单站	1500*4	37.7	5060
分区	2100*4	46.7	3260
两站	1500*4	35.0	5600
分区	2100*4	43.3	3940
三站	1500*6	48.6	2880
链式	2100*6	59.1	780

规划年西北电网各分区内电源容量在 2000~6000 MW, 电源所能提供的短路电流大约为 10~30 kA。当实际电网分区内电源接入 330 kV 站的等值距离越远时, 其提供的短路电流则越小。当电厂装机规模增大时, 其提供的短路电流将会提高。

## 2 电网分区理论原则提出

### 2.1 短路电流水平分析

结合前述不同分区模型的短路电流计算结果, 对于三站链式分区模型, 每站两台容量为 2100 MVA 主变并列运行情况下, 中间短路时 750 kV 系统侧注入 330 kV 母线的短路电流为 59.1 kA, 考虑到电网分区内应有一定容量电源接入, 此时若想控制三相短路电流水平在 63 kA 以内, 允许接入的最大电源容量只能为 780 MW。所以, 受短路电流约束, 每个分区内主变台数配置最好不要超过 6 台。当一座 750 kV 站主变台数为两台或三台时, 一般两座或三座 750 kV 站构成一个分区。

### 2.2 分区内主变负载情况分析

750 kV 和 330 kV 电网满足 N-1 准则是实现电磁环网解环运行和分区供电的基本条件之一。假定电网分区后, 分区内共有主变 4 台, 主变容量均为  $S_T$ 。一般在负荷增长较快地区电网分区内主变容载

比为 2, 即该分区内总变电容量为  $4S_T$ , 总负荷为  $2S_T$ , 平均每台主变带  $0.5S_T$  的负荷。考虑主变检修方式下发生主变 N-1, 此时剩余两台主变共带  $2S_T$  的负荷, 变压器满载。若分区内主变台数少于 4 台, 主变 N-1 方式下剩余一台主变存在过载问题。因此, 在不采取其他措施的情况下, 考虑到主变检修方式下 N-1 情况, 兼顾电网分区内变电容量和容载比, 建议分区内主变台数配置应不少于 4 台。

综合以上对分区内短路电流水平及主变负载情况的分析, 可将 2~3 座 750 kV 站划为一个分区, 每个分区内宜配置 4~6 台主变。除了以上两个主要原则外, 在兼顾短路电流水平的同时还应考虑分区电网运行的灵活性, 任一分区内 750 kV 主变台数都应在合理范围内, 相邻分区之间保持互为备用。

实际电网中, 存在一个分区内 750 kV 变电站数量多于 3 座的情况, 此时分区内的主变数量大于 6 台, 并且有一定容量的电源接入, 但此时分区内短路电流水平并不超标。主要原因在于分区内 330 kV 变电站之间线路距离较长, 线路电抗较大, 使得即使分区内主变台数超过 6 台且又有电源接入, 短路电流也不超标。另外, 实际电网中也存在分区内主变数量少于 4 台的情况, 此时分区电网能够满足短路电流要求, 但难以满足主变检修方式 N-1 下供电可靠性。

## 3 分区原则在实际电网中的应用

随着青海电网的不断发展, 远景年青海规划电网短路电流超标问题较为突出。本文利用所提受端电网合理分区规模, 完成了青海受端电网分区方案研究。

青海受端电网规划中共有 6 座 750 kV 变电站和 16 台主变。考虑相互之间的联系和电气距离, 选择将西宁北与江仓两站划为一个分区, 佑宁 4 台主变两两分列运行, 其中两台主变与西宁三台主变构成一个分区, 另外两台主变与官亭两台主变构成一个分区。采取分区措施后的青海电网结构如图 4 所示。

青海电网分区解环运行后与全接线方式下 330 kV 母线短路电流计算结果对比如表 5 所示。

由图 4 所示, 采取分区方案后将青海东部电网分成 4 个分区, 实施解环工程后, 青海地区电网 330 kV 母线短路电流得到明显抑制, 分区后短路电流降低 2.1~22.68 kA 不等, 尤其解环点附近母线短路电流降低明显。结合以上分区方案, 除日月山地区外, 其他分区基本满足 2~3 座 750 kV 变电站、4~6 台主变的分区原则, 在满足短路电流水平的前提下, 能够保证主变检修方式下 N-1 剩余主变不过载。

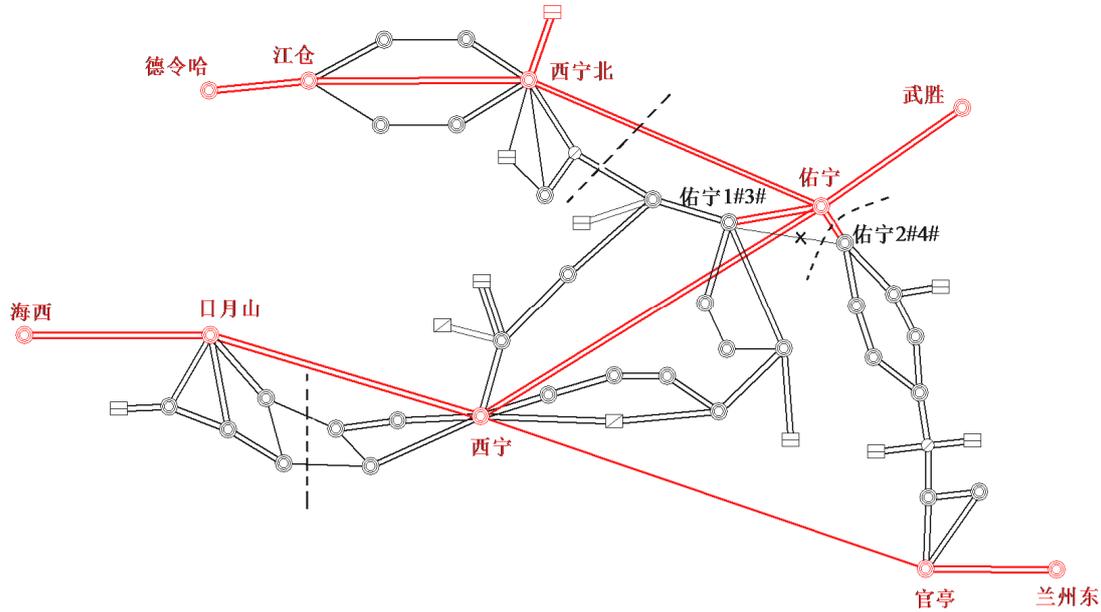


图 4 青海规划电网分区方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of Qinghai power grid partition scheme

表 5 分区前后青海 330 kV 电网短路电流水平

Table 5 Short-circuit current level of Qinghai 330 kV power grid before and after the partition

330 kV 母线	全接线方式下三相短路电流/kA	分区后三相短路电流/kA	开关遮断电流/kA
日月山分区			
日月山	56.53	54.43	63
西宁-佑宁分区			
西宁	62.71	56.94	63
佑宁	55.68	48.02	63
上新庄	60.67	55.27	63
景阳	54.44	37.40	50
泉湾	51.45	47.50	50
贵强	50.6	46.80	50
花园	50.27	43.77	50
向阳	49.91	44.18	50
佑宁-官亭分区			
佑宁	55.68	39.74	63
官亭	50.79	43.05	50
西宁北-江仓分区			
西宁北	51.72	32.83	50
山城	51.2	28.52	50

该分区方案下出现日月山 750 kV 站三台主变独立带一片 330 kV 电网的情况, 由于日月山站与西宁站合环运行, 日月山、西宁 330 kV 母线短路电流将严重超标, 导致日月山站只能三台主变独立带一片 330 kV 电网。为保证供电可靠性, 需对分区内电源提出苛刻要求, 也会给分区内电源及主变的运行控制和检修工作带来困难。

## 4 结论

根据西北实际受端电网结构特点, 构建了单座、两座和三座 750 kV 站带一片 330 kV 电网的电网分区等值模型, 提出了 750/330 kV 受端电网合理分区供电规模。针对电网不同分区模型, 考虑站内主变容量和台数不同、站间线路长度不同以及分区内一定容量电源接入的影响, 分区主变台数配置上限以 6 台为宜; 考虑主变检修方式 N-1 时剩余主变的过载问题, 分区内主变台数配置宜大于等于 4 台。750 kV 变电站多为 2~3 台主变, 因此考虑供电可靠性情况下, 以 2~3 站 4~6 台主变构成一个电网分区。最后, 以青海规划电网为例进行验证, 结果表明, 所提 750/330 kV 电网合理分区供电规模是有效的和可行的。

## 参考文献

- [1] 王梅义, 吴竟昌, 蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-151. HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 141-151.
- [3] 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.
- [4] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 62-67.  
YANG Dong, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Analysis on influence of power grid structure upon short circuit level and power receiving capability[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 62-67.
- [5] 徐贤, 丁涛, 万秋兰. 限制短路电流的 220 kV 电网分区优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 33(22): 98-101.  
XU Xian, DING Tao, WAN Qiulan. 220 kV power grid district-dividing optimization for limiting fault current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 33(22): 98-101.
- [6] 张啸虎, 朱忠烈, 祝瑞金. 220 kV 分区电网的合理配置研究[J]. 华东电力, 2006, 34(5): 36-41.  
ZHANG Xiaohu, ZHU Zhonglie, ZHU Ruijin. Reasonable configuration of 220 kV district grids[J]. East China Electric Power, 2006, 34(5): 36-41.
- [7] 郝文斌, 夏春, 王彪, 等. 一种基于图论搜索的限制短路电流分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 38-44.  
HAO Wenbin, XIA Chun, WANG Biao, et al. A short-circuit current limiting partitioning method based on graph theory search[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 38-44.
- [8] 杨桂兴, 王赛, 宋占党, 等. 750/220 kV 电网分区原则理论研究[J]. 电气应用, 2015(20): 32-35.  
YANG Guixing, WANG Sai, SONG Zhandang, et al. Theoretical research on the principle of 750/220 kV power grid division[J]. Electrical Applications, 2015(20): 32-35.
- [9] 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.
- [10] 杨晓妮, 李海伟, 张宝金, 等. 甘肃中部 750/330 kV 电磁环网解环研究[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(3): 1-6.  
YANG Xiaoni, LI Haiwei, ZHANG Baojin, et al. Research on the uncoupling 750/330 kV electromagnetic loop network in central Gansu power network[J]. Electric Power Science & Engineering, 2013, 29(3): 1-6.
- [11] 潘炜, 刘文颖, 杨以涵, 等. 电磁环网条件下西北 750 kV 电网运行方式的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 33-38.  
PAN Wei, LIU Wenyong, YANG Yihan, et al. Research on operating modes of 750 kV northwest China power grid electro-magnetically coupled with 330 kV power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 33-38.
- [12] 李晗, 罗建生. 北京电网分层分区与调度运行分析[J]. 现代电力, 2005, 22(4): 29-33.  
LI Han, LUO Jiansheng. Analysis of delamination and subarea, dispatching control of power system in Beijing[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(4): 29-33.
- [13] 刘树勇, 顾强, 张丽娟, 等. “十一五”期间天津 500/220 kV 电网分区供电方案[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 51-55.  
LIU Shuyong, GU Qiang, ZHANG Lijuan, et al. Research on power supply scheme based on partitioning of 500/220 kV Tianjin power grid during the 11th five-year plan[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 51-55.
- [14] 李顺昕, 张隽, 赵峰, 等. 唐山地区 220 kV 电网分区供电方案研究[J]. 电气应用, 2015(15): 30-34.  
LI Shunxin, ZHANG Juan, ZHAO Feng, et al. The division of power supply scheme of 220 kV power network in Tangshan area[J]. Electrical Applications, 2015(15): 30-34.
- [15] 韩子娇, 李正文, 赵鹏, 等. 基于改进模糊 AHP 的电磁环网解环方案评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 95-101.  
HAN Zijiao, LI Zhengwen, ZHAO Peng, et al. Scheme evaluation for decoupling electromagnetic loop networks based on improved fuzzy AHP[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 95-101.

收稿日期: 2016-10-08; 修回日期: 2016-12-15

作者简介:

张祥成(1983—), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力系统规划方面的工作; E-mail: tianxu0111@163.com

郭秋婷(1990—), 女, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: qt\_guo3721@126.com

潘艳(1986—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: pan123456panyan@163.com

(编辑 葛艳娜)