

电磁环网解环暂态稳定和电压稳定量化评估

《电力系统安全稳定导则》规定：应避免和消除严重影响电网安全稳定的不同电压等级的电磁环网。电磁环网的解环决策需要进行潮流、稳定性和短路电流等多方面的分析计算。本文针对电磁环网开环操作对电力系统暂态稳定性和电压稳定性的影响，建立量化评价指标和计算方法。其中暂态稳定性指标为联络线相同故障下的临界故障隔离时间，电压稳定性指标为联络线满足 $N-m$ 下的静态功率传送能力。

田蓓¹ 赵二岗² 顾雨嘉¹ 李宏强¹ 宋云亭³ 田浩^{2/1}. 国家电网宁夏电力公司电力科学研究院 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系 3. 中国电力科学研究院

0 引言

高低压电磁环网是指两组不同电压等级运行的线路，通过两端变压器磁回路的联接而并联运行^[1]。

在高电压等级电网发展初期，高低压电磁环网通过的潮流不大，它的存在不但可以提高电网供电的可靠性和灵活性，还能输送更多的潮流，满足负荷侧用电和电源侧送电的需求。然而随着高电压等级电网发展不断成熟，电磁环网对电网运行产生了严重的负面影响。引起的问题如下：

1) 热稳定问题。在高低压电磁环网运行方式下，如果高压线路故障，负荷转移到与其并列运行的低压线路或变压器上，极易超过线路或变压器的容量，导致其低压线路跳闸。严重情况下会引发连锁故障，扩大事故范围。

2) 系统振荡问题。在高低压电磁环网结构下，正常时，其两侧系统间的联络阻抗将小于高压线路的阻抗。而高压线路一旦故障断开，功率转移到与之并联的低压线路上，系统间的联络阻抗将

突然显著地增大为两侧变压器和低压线路阻抗之和，可能超过联络线的暂态稳定极限，造成系统的稳定极限降低，引起系统间的振荡。

3) 短路电流问题。电力系统的短路电流水平取决于装机规模和电网的密集程度。电磁环网运行方式下，网架密集，结构不清晰，从而使短路电流问题日益严重。

4) 继电保护装置和安全自动装置的复杂化。电磁环网结构不仅使继电保护装置和安全自动装置变得复杂，而且配合难度也加大。

此外，电磁环网运行方式也使电网潮流不易控制、调度运行风险增加以及可能带来更高的网损，难以达到经济运行状态。

1 电磁环网解环研究

文献^[2]规定：应避免和消除严重影响电网安全稳定的不同电压等级的电磁环网，发电厂不宜装设构成电磁环网的联络变压器。但是由于电网发展的复杂性和多样性，对于电磁环网何时解环、何处解环及解环方案评价等问题应进行潮流、稳定性及短路电流等多方面的分析计算，综合利弊后才能做出决策，并给出指导建议。然而，在对电磁环网解环时，应首先保证解环后的电网安全稳定水平达到文献^[3]规定的安全稳定标准。解环应有利于提高电网安全性，一般不应使其下降，否则慎重解环。

文献^[8]指出，从电磁环网运行方式到分层分区运行方式的转变过程中，需要分析开环操作对系统安全稳定性的影响。解环后的电网不仅满足 $N-1$ 准则，



田蓓/高级工程师

关键词/Keywords

电磁环网 ·

暂态稳定水平 ·

电压稳定水平 ·

临界故障隔离时间 ·

静态功率传送极限 ·

还要满足《电力系统安全稳定导则》所规定的各项标准。文献^[9]在对福建电网500 kV/220 kV电磁环网解环运行的可行性研究中,分析了电磁环网解环运行对福建电网安全稳定水平的影响,采用了临界切除时间指标作为安全稳定的指标。文献^[10]在2005年湖南西部电网开、合环研究中,对电网进行安全性分析时,只给出了开、合环稳定计算结果。文献^[11]采用热稳定限额和暂态稳限额指标,对2004~2005年江苏电网分层分区后的电网稳定性进行了分析。文献^[13]在宁夏电网电磁环网解环时序分析中,对解环后的系统特定输电通道设置故障,观察机组的功角稳定曲线,来判断解环后系统是否失稳。文献^[14-16]在甘肃不同类型的电磁环网解环研究中,对解环方案进行潮流计算,分析 $N-1$ 方式和正常方式下,系统潮流分布情况,从而进行潮流分布比较。文献^[17]总结了各种类型电磁环网解环研究的基本原则和方法,指出比较不同类型电磁环网解环方案评价时,侧重应有所不同。对重要输电断面的电磁环网,应首先考虑解环,但是严格按文献^[2]的要求进行校验。受端电网上的电磁环网主要衡量解环前后是否有效限制了短路电流。输电通道上的电磁环网,应进行充分的潮流计算,注重比较解环前后的潮流分布。但是任何类型的电磁环网解环后的系统都要满足电网安全稳定运行的要求。

综上所述,在对解环后的电网进行安全稳定的校核和评价方面,文献^[9]提出了临界切除时间作为安全稳定的评价指标,但未能对电网的安全稳定性做全面评价,缺少对电压稳定的校核和评价。文献^[10]采用热稳定限额和暂态稳限额作为电网稳定性的分析指标,也未能体现电压稳定。文献^[13]采用设置特定输电通道故障的方法,通过观察功角曲线来判定系统稳定,未能给出系统安全稳定的具体量化指标,不能对安全稳定做出详细评价。

为此提出:在对解环后的电网进行安全稳定性校核和评价方面,分别对解环后的电网方案做暂态稳定和电压稳定校核;暂态稳定的量化评估指标采用临界故障隔离时间(Critical Clearance Time, CCT),采用静态输电能力来表征解环前后电网静态电压安全水平^[5]。

具体工作如下:第一部分介绍了在电磁环网安全稳定性校核和评价方面的现状,提出对解环前后的电网应分别进行暂态稳定和电压稳定的校核,并采用CCT作为暂态稳定的评价指标,而用静态输电能力作为电网静态电压安全水平的评价指标。第二部分和第三部分,以宁夏电网与甘肃电网的输电断面的电磁环网为实际算例,采用联络线相同故障下CCT表征解环前后电网暂态安全稳定水平,通过电磁环网不同电压等级联络线 $N-m$ 后的静态输电能力来表征解环前后电网静态电压安全水平。第四部分,分析了不同类型的电磁环网量化评估的特点。第五部分,对前面工作的进行总结,并得出结论。

2 电磁环网解环前后暂态稳定量化评估

从电网稳定性角度而言,要求解环后的电网应达到文献^[3]规定的安全稳定标准,一般情况下电磁环网解环后应有利于提高电网安全稳定水平,一般不应使其下降。所以电磁环网解环后首先应该进行电网安全校核,确保解环后的电网满足电网安全稳定标准。在此基础上通过安全稳定水平量化分析结果来确定解环前后的安全稳定水平。CCT代表了系统稳定和不稳定的边界,通过对解环前后电网的CCT指标量化评估电网的暂态安全水平^[6]。

本文将宁夏电网省际间联络通道电磁环网为例,通过计算电磁环网解环前后的CCT指标阐述如何通过CCT指标量化地表征电磁环网解合环前后电网的暂态安全稳定变化情况。宁夏电网省际间联络通道电磁环网属于750 kV/330 kV电磁环网,电网结构示意图如图1所示。联络线详情如表1所示。

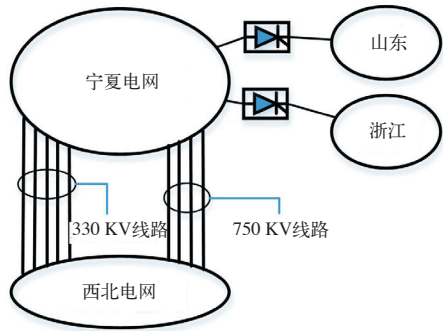


图1 宁夏电网情况

表1 宁夏电网络络线详情

线路	电压等级/kV	线路回数
甘白银—宁黄河	750	2
甘平凉—宁六盘山	750	2
甘白银—宁宁安	330	2
甘石城—宁迎水桥	330	1
甘靖远—宁固原	330	1
甘西峰—宁固原	330	1

电磁环网解环后电网安全校核按第三级安全标准校核，考虑到实际情况，宁夏电网750联络线为双回线，按同杆并架双回线故障，双回线三相同时跳开设置故障^[3]。

1) 功角稳定判据。电网遭受每一次大扰动后，引起电力系统各机组之间功角相对增大，在经过第一、第二摇摆不失步^[3]。

2) 暂态电压稳定判据。暂态过程中，负荷母线电压能够恢复到0.80p.u.以上^[3]。

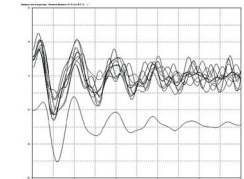
3) 安全校核计算。在750 kV甘白银—宁黄河和甘平凉—宁六盘山线路上设置三相短路故障，0.1 s故障隔离并跳开双回线路^[3]。

4) CCT计算。故障设置与安全校核一致，通过试探方法不断增大故障隔离时间，按文献^[3]所规定的安全标准进行安全校核，故障下保障电网安全的最大故障隔离时间即CCT。

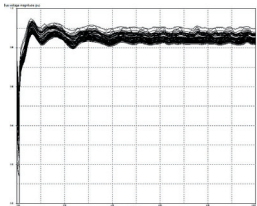
2.1 电磁环网解环后电网安全校核

电磁环网解环后，西北电网与宁夏电网四回750 kV线路联络。电网解环前后发电负荷方式相同，按前文所描述故障进行安全校核。

1) 故障1：甘白银—宁黄河三相短路，0.1 s故障隔离后甘白银—宁黄河双回线N-2。安全校核结果如图2所示。



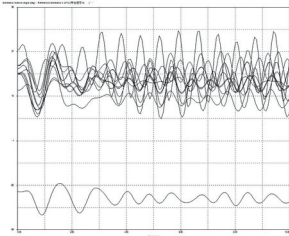
(a) 大坝电厂、六盘山电厂、灵武电厂发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线



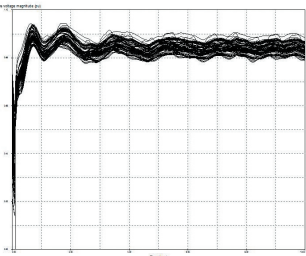
(b) 宁夏电网内所有220 kV及以上母线电压曲线

图2 750 kV甘白银—宁黄河三相短路故障后N-2安全校核结果

2) 故障2：甘平凉—宁六盘山三相短路，0.1 s故障隔离后甘平凉—宁六盘山双回线N-2。安全校核结果如图3所示。



(a) 大坝电厂、六盘山电厂、灵武电厂发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线



(b) 宁夏电网内所有220 kV及以上母线电压曲线

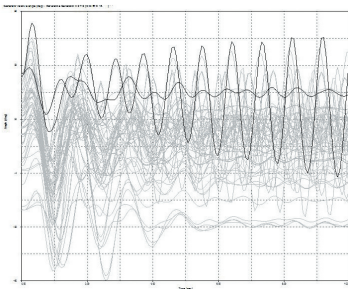
图3 750 kV甘平凉—宁六盘山三相短路故障后N-2安全校核结果

故障1和故障2仿真结果表明，750 kV双回线三相短路后N-2故障安全校核结果：稳定。

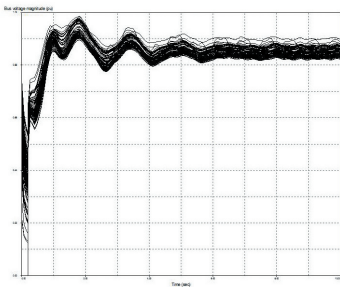
宁夏750 kV/330 kV电磁环网解环，满足所要求的安全标准。

2.2 电磁环网解环前CCT计算

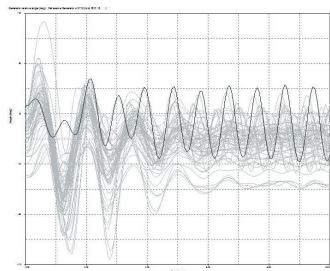
1) 故障1：甘白银—宁黄河三相短路，故障隔离后甘白银—宁黄河双回线N-2。结果如图4所示。



(a) CCT下，宁夏电网+甘崇信发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线



(b) CCT下，宁夏电网内所有220 kV及以上母线电压曲线

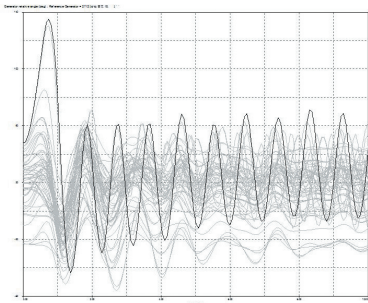


(c) 0.19 s隔离故障，宁夏电网+甘崇信发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线

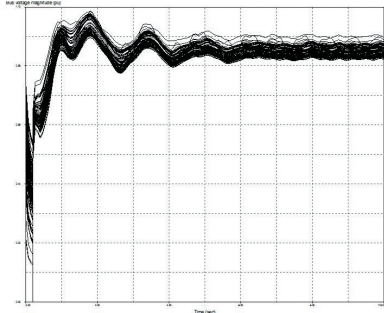
图4 750 kV甘白银-宁黄河三相短路故障后N-2CCT结果

CCT计算结果等于0.191 4 s，甘崇信G1发电机失稳。0.19 s安全校核，计算结果稳定。

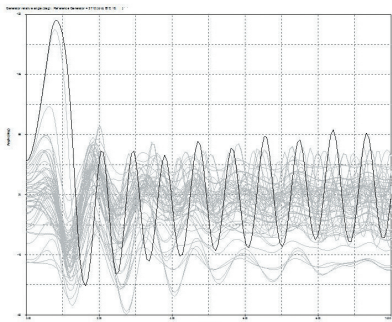
2) 故障2：甘平凉-宁六盘山三相短路，故障隔离后甘平凉-宁六盘山双回线N-2。结果如图5所示。



(a) CCT下，宁夏电网+甘崇信发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线



(b) CCT下，宁夏电网内所有220 kV及以上母线电压曲线



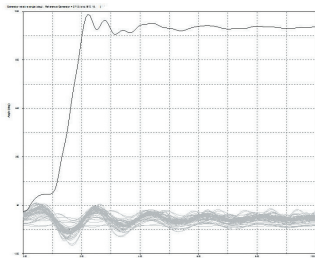
(c) 0.64 s隔离故障，宁夏电网+甘崇信发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线

图5 750 kV甘平凉-宁六盘山三相短路故障后N-2CCT结果

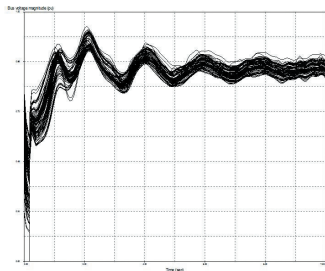
CCT计算结果等于0.643 8 s，甘崇信G1发电机失稳。0.64 s安全校核，计算结果稳定。

2.3 电磁环网解环后CCT计算

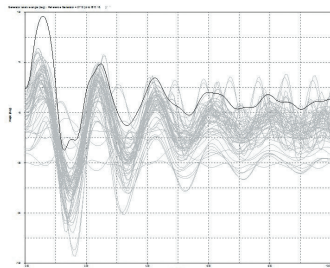
1) 故障1：甘白银-宁黄河三相短路，故障隔离后甘白银-宁黄河双回线N-2。结果如图6所示。



(a) CCT下，宁夏电网发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线



(b) CCT下，宁夏电网内所有220 kV及以上母线电压曲线

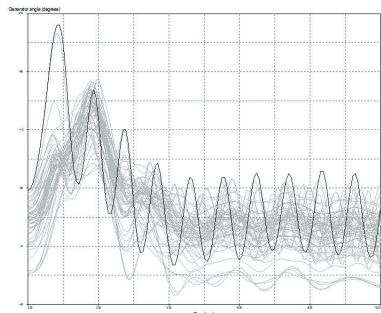


(c) 0.17 s隔离故障，宁夏电网发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线

图6 750 kV甘白银-宁黄河三相短路故障后N-2CCT结果

CCT计算结果等于0.1773 s，宁烯烃G1发电机失稳。0.17 s安全校核，计算结果稳定。

2) 故障2：甘平凉-宁六盘山三相短路，故障隔离后甘平凉-宁六盘山双回线N-2。结果如图7所示。



(a) CCT下，宁夏电网+甘崇信发电机相对青海拉西瓦发电机摇摆曲线

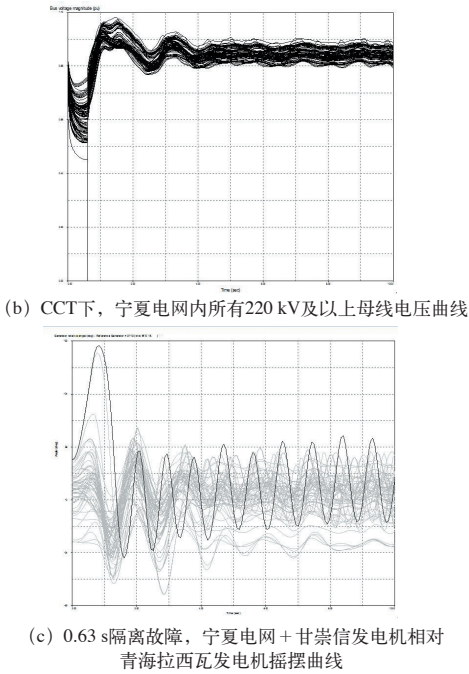


图7 750 kV甘平凉—宁六盘山三相短路故障后N-2CCT结果
CCT计算结果等于0.635 8 s, 甘崇信G1发电机失稳。0.63 s安全校核, 计算结果稳定。

2.4 电磁环网解环前后暂态安全水平量化评估

电磁环网解合环暂态稳定量化评估结果如表2所示。

表2 电磁环网解合环暂态稳定量化评估结果

故障	解环前CCT/s	解环后CCT/s
750 kV甘白银—宁黄河N-2	0.191 4	0.177 3
750 kV甘平凉—宁六盘山N-2	0.643 8	0.635 8

从计算结果可观察, 宁夏电网750 kV/330 kV电磁环网解环后, 满足电网安全稳定标准, 电网暂态安全水平降低7.36% (注: 降低水平 = $100 (CCT_z - CCT_c) / CCT_z$, 其中, CCT_z 和 CCT_c 分别为解环前CCT值和解环后CCT值)。

3 电磁环网解环前后电压稳定量化评估

电磁环网解环后的电网应有较强的抗扰动能, 并满足《导则》中规定的有关各项安全稳定标准, 包括满足功角稳定和电压稳定的要求^[4]。本文中采用静态功率传送极限值作为电压稳定的量化指标。以宁夏电网为例, 通过计算宁夏电网省级联络通道的静态功率传送极限对电磁环网解环前后电压稳定进行量化评估。

根据文献^[3], 进行静态电压稳定计算分析是用逐渐增加负荷 (根据情况可按照保持恒定初始功

率因数的方法按比例增加负荷) 的方法求解电压失稳的临界点, 从而估计当前运行点的电压稳定裕度^[3]。

研究故障选择: ①可能引发大量潮流转移的线路故障。②受端电网重要机组停机故障。③受端电网重要降压变故障等^[3]。

区域有功功率裕度: $K_p = 100 (P_z - P_c) / P_z$, 其中, P_z 和 P_c 分别为初始有功和临界有功^[7]。

根据宁夏电网实际情况, 通过逐渐减少宁夏电网发电的方法求解电压失稳的临界点, 从而估计当前运行点的电压稳定裕度。有功功率裕度指标是通过联络线总功率计算得到的。电压稳定计算方案示意如图8所示。

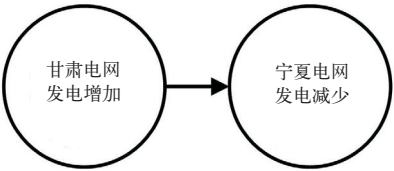


图8 电压稳定计算方案示意

3.1 电磁环网解环后电网静态电压安全校核

电磁环网解环后, 西北电网与宁夏电网四回750 kV线路联络。电网解环前后发电负荷方式相同, 进行静态电压安全校核, 计算结果如表3所示。

表3 电网静态功率传送极限表

初始值	2 699.3
极限值	6 791
$K_p(\%)$	151.58

按有功稳定储备系数 $K_p \geq 8\%$ ^[7]电磁环网解环后, 满足静态电压稳定安全标准要求。

3.2 电磁环网解环前后电网静态电压安全水平量化评估

根据电磁环网的实际情况, 通过设置330 kV线路N-5故障模拟电网解环。电压稳定计算的故障集合如表4所示。

表4 电压稳定计算的故障集合

线路	电压等级/kV	故障
甘白银—宁宁安2回	330	N-5
甘石城—宁迎水桥	330	
甘靖远—宁固原	330	
甘西峰—宁固原	330	

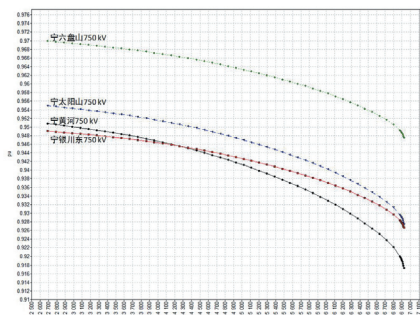
电网计算方式采用解环前计算方式，通过以上故障下电网静态功率传送极限值进行电磁环网解环后对电网静态电压安全影响的量化评估。计算结果如表5所示。

表5 电网静态功率传送极限表

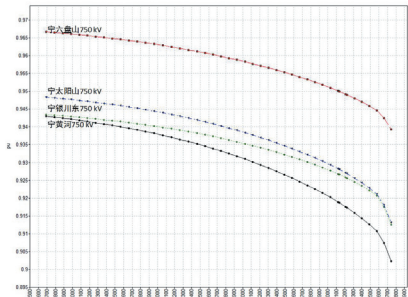
	无故障/MW	330 kV N—5/MW
初始值	2 691.0	2 699.7
极限值	6 903.1	6 756.8
$K_p(\%)$	156.53	150.28

从计算可以观察到无故障宁夏电网静态输电极限等于6 903.1 MW，而330 kV线路N—M后的静态输电极限等于6 756.8 MW，电网静态电压输电能力几乎不受330 kV电磁环网解环影响。

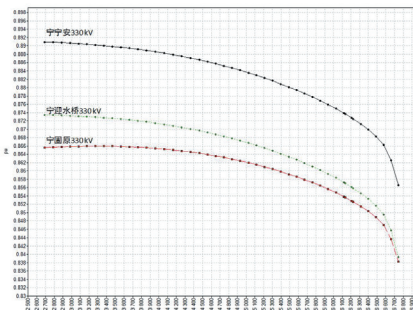
电压崩溃点在甘肃风电，宁夏电网750 kV母线电压PV曲线如图9所示。



(a) 电磁环网合环方式下的750 kV母线PV曲线



(b) 电磁环网解环方式下750 kV母线PV曲线



(c) 电磁环网解环方式下330 kV母线PV曲线

图9 宁夏750 kV母线PV曲线

电磁环网解合环静态稳定量化评估结果如表6所示。

表6 电磁环网解合环静态稳定量化评估结果

	解环前	解环后
静稳定极限值/MW	6 903.1	6 756.8
$K_p(\%)$	156.53	150.28

电磁环网解环后，电网电压安全水平降低2.12%（注：降低水平=100 $(P_z - P_c) / P_z$ ，其中 $(P_z$ 和 P_c 分别为解环前输电功率极限值和解环后输电功率极限值)。宁夏电网电源十分充足，电磁环网的解合环不受电压稳定限制。

4 不同类型的电磁环网的量化评估

电磁环网可分为重要输电断面的电磁环网、输电通道上的电磁环网和受端电网内部的电磁环网等3种不同形式^[17]。重要输电断面和输电通道概念比较模糊，区别在于输电通道有明确的线路等设备集合。总结而言电磁环网可概括分为两类：①输电通道电磁环网。②受端电网内部的电磁环网。本文第二和第三部分是以输电通道电磁环网为例进行分析的。

对于受端电网电磁环网而言，量化评估是一致的。这种情况下，电压稳定可能是限制解环的因素（这点与本文中宁夏电网的电磁环网解环不受电压安全限制的结论可能有所不同）；另外CCT计算中故障的设置需要根据电磁环网解环后对电网的实际影响情况进行设置（注：输电通道电磁环网解环后往往体现出通道两侧系统联络减弱，所以输电通道故障的CCT基本可以反映出电网暂态安全的变化情况）。详细的计算分析本文中不列举了。

5 结束语

本文以宁夏电网为例，进行了电磁环网解环暂态稳定和电压稳定量化指标的评估，总结如下：

- 1) 通过CCT量化表征了电磁环网解环前后的暂态稳定水平，计算结果表明解环后电网暂态安全水平满足电网安全准则的要求，电网暂态安全水平降低7.36%。
- 2) 通过电网静态功率输送极限，对电磁环网解环前后的电压稳定水平进行了量化评估。计

算结果表明解环后电网静态电压安全水平降低了2.12%。

3) 分析了不同类型的电磁环网进行暂态稳定和电压稳定量化评估的特点, 本文所提出的量化评估方法对于受端电网内部的电磁环网和输电通道上的电磁环网均适用。

参考文献

[1] 李民. 镇江电网分层分区运行的研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.

[2] DL755-2001, 电力系统安全稳定导则[S].

[3] Q/GDW404-2010, 国家电网安全稳定计算技术规范.

[4] 孔涛, 王洪涛, 刘玉田, 等. 500-220 kV电磁环网开环研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 12(23): 13-16.

[5] Prabha kundur. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[6] 王守相, 张伯明, 刘映尚. 事故临界切除时区计算及其在事故扫描中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 72-77.

[7] DL/T1172-2013, 电力系统电压稳定评价导则[S].

[8] 李春叶, 李胜, 尚敬福, 等. 电磁环网方式与分层分区运行方式之决策[J]. 电力学报, 2006, 21(2): 160-163.

[9] 林章岁, 郑春平, 吴威. 福建电网500-220 kV电磁环网解环运行的可行性研究[J]. 福建电力与电工, 2003, 2(23): 1-4.

[10] 秦跃进, 汪勇, 胡广. 2005年湖北电网电磁环网问题研究[J]. 华中电力, 2002, 15(6): 15-17.

[11] 胡伟. 2004~2005年江苏电网分层分区运行分析[J]. 华东电力, 2003(8): 14-17.

[12] 高芳, 王伟, 陶玉华. 上海电网220 kV系统短路容量限制措施[J]. 华东电力, 2002(10): 14-16.

[13] 田蓓, 项丽, 张爽, 等. 宁夏电网电磁环网解环时序分析[J]. 宁夏电力, 2014(12): 7-12, 39.

[14] 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): 1-5.

[15] 杨晓妮, 李海伟, 张宝金, 等. 甘肃断面750/330 kV电磁环网解环研究[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(4): 48-51.

[16] 杨勇, 郑晶晶. 甘肃330 kV、220 kV电网电磁环网解环研究[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(6): 11-13.

[17] 王莉丽, 韩伟. 不同类型电磁环网解环研究的基本原则与方法[J]. 四川电力技术, 2012, 35(6): 20-22, 39.

作者简介

田蓓 (1977-), 女, 本科, 从事电力系统分析计算及规划、科研等工作。

赵二岗 (1991-), 男, 硕士, 从事大电网可靠性评估和电力系统规划等工作。

顾雨嘉 (1986-), 男, 硕士, 从事电力系统分析计算及规划、科研等工作。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**
(编辑: 崔文静)