

超高压电磁环网的特点与案例分析

李 刚¹, 刘晓瑞¹, 孙建波²

(1. 国网湖北省电力公司, 湖北省武汉市 430077; 2. 中南电力设计院, 湖北省武汉市 430071)

摘要: 针对仍普遍存在的超、特高压电磁环网,结合省级电网的实例总结了电磁环网的不同发展形态和结构,认为电磁环网的主要风险在于潮流转移和控制,并提出了衡量电磁环网强弱和风险的耦合度指标。在网络结构优化和加强方面,认为强耦合的弱电磁环应优先加强上级电网,弱耦合的强电磁环应优先考虑短路控制和简化结构,多级电磁环应尽快解耦等,分析了电磁环网的典型分片方案。鉴于超、特高压电磁环网将长期存在,阐述了电磁环网单一和连锁跳闸后实用化的潮流转移控制方法,特别是针对大功率、强耦合型电磁环网提出了一种严重故障后快速切除联络元件的非常规稳定控制措施,以实现解耦控制、均衡潮流,有效提升过渡期电网的稳定水平和输电能力。在实际电网中的多个应用实例表明其效果良好。

关键词: 电磁环网; 耦合; 潮流转移; 解环; 解耦控制

0 引言

目前,国内 220 kV/110 kV 电磁环网已基本解环运行,但 220 kV 及以上电磁环网仍大量存在。多年来,学者和业界人士已对电磁环网开展了大量的分析和探讨,例如:文献[1]对环网潮流控制进行了研究;文献[2-5]对电磁环网的特点和优缺点、运行方式、解环原则和步骤、评价方法等方面进行了研究;文献[6]对弱电磁环网运行控制面临的问题和对策进行了研究;文献[7]探讨了电磁环网的弱开环方式;文献[8-9]涉及了 1 000 kV/500 kV/220 kV 三级电磁环网;文献[10-11]指出需重视线路无故障跳线校核等。

一般认为电磁环网的缺点和风险^[12-14]主要包括:①上级电网故障后功率转移导致下级电网过载,其原因是上下级电网输电能力的不匹配;②上级电网故障后阻抗突增引发暂态失稳甚至系统振荡,其原因是上下级电网阻抗的不匹配;③系统短路水平增加,下级电网短路易超标;④网络结构不清晰,潮流转移特性复杂,增加了不可控的连锁故障风险;⑤增加了保护整定和二三道防线配置的困难。

从结构上看,电磁环网和同一电压等级元件构成的普通环网并无本质区别,最大的不同在于:电磁环网由于上下级电网阻抗和传输容量相差较大导致不平衡特性较为突出。而合理的且能充分发挥自身

能力的电网一般结构特性较为均衡。随着电力系统的不断发展,电磁环网的形态愈加丰富和多样,有必要进行系统性分析,采取不同的应对策略。

1 电磁环网的不同形态和结构

1.1 弱环型与强环型

根据电磁环网的结构强弱,电磁环网可分为以下几种类型,如图 1 所示。图中,粗线、细线分别表示高、低压线路。

1) 典型弱环网

上、下级电网均薄弱的为典型弱环网,该结构的热稳定、暂/动态稳定较差,上级电网输电能力严重受限且不具备解环条件,与下文弱环Ⅰ型的共同点是上级通道故障后其潮流 100%转移至下级电网。

2) 弱环网Ⅰ型

上级电网薄弱(发展不完善)而下级电网相对坚强的可定义为弱环网Ⅰ型,其主要问题是上级电网故障后功率转移可能导致下级薄弱环节元件过载。

3) 弱环网Ⅱ型

上级电网坚强而下级电网相对薄弱的可定义为弱环网Ⅱ型,上级电网的某一通道故障,潮流主要在上级电网内部转移,穿越下级电网的潮流较小,且系统阻抗没有显著增加,正常方式下运行风险较小,但在上级电网检修时可能存在典型弱环网的特性。

4) 强环网

上、下级电网均坚强的为强环网,其解环的必要性往往源于网络规模偏大或过于复杂时短路水平控

制要求和预防不可控的连锁故障风险,通过解环将电网结构清晰化、解耦化是有益的。

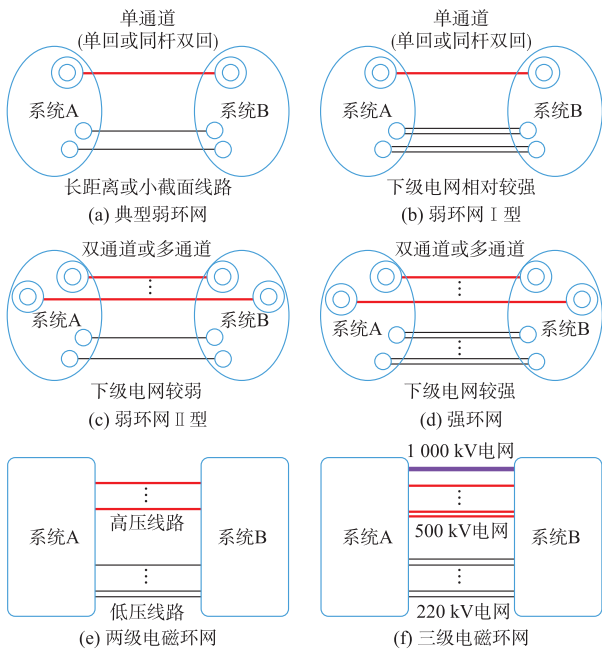


图 1 不同类型电磁环网示意图
Fig.1 Schematic diagram of various types of electromagnetic loop network

1.2 简单/显性型与复杂/隐性型电磁环网

简单型电磁环网上、下输电通道之间存在直接的电磁耦合关系和明确的并联结构,一般出现在相邻上级变电站之间(两个电磁耦合点),具有明显的上级主干输电通道和下级并联输电通道,耦合点及潮流转移特性较为清晰,如典型弱环网和弱环网 I 型。复杂型电磁环网一般属于隐性结构,上级通道故障后潮流向上、下多个通道转移,甚至不存在明显的上级主干通道,潮流转移特性复杂甚至隐蔽,有多个电磁耦合点,属于非典型电磁环。

1.3 双级型与多级型电磁环网

典型的电磁环网一般涉及两个电压等级,500 kV 电网发展初期出现过 500 kV/220 kV/110 kV 三级电磁环网,随着 110 kV 电网的分片开环运行,这种情况基本消失,但是特高压电网建设过程中又出现了 1 000 kV/500 kV/220 kV 三级电磁环网,如图 1(f)所示,增加了电网运行的复杂性和风险。

2 电磁环网的运行特性与结构优化分析

2.1 概述及电磁环网的耦合度指标

作为环网的特例,电磁环网运行分析的重点在于评估主干输电元件或通道故障前后的网络阻抗特性变化及其对下级电网的影响。对于图 1(e)中的

两级电磁环网结构,任一上级电网线路(或通道)故障后转移至任一下级电网线路的转移比 λ_{ij} 可用下式表示:

$$\lambda_{ij} = \frac{P_{lj1} - P_{lj0}}{P_{hi0}} \tag{1}$$

式中: P_{lj0} 和 P_{lj1} 分别为故障前、后下级线路 j 的有功功率; P_{hi0} 为上级线路 i 故障前的有功功率。

定义 $\lambda_{i\Sigma}$ 为上级线路 i 故障后经下级电网转移比之和,耦合度 $\lambda_{\Sigma\max}$ 为其中的最大值,与之相应的上级输电线路/通道可定义为该电磁环网的主干通道(一般是与下级电网并联的上级通道中阻抗最小者),耦合度主要取决于主干通道故障后上、下级电网之间的阻抗差异,也在一定程度上反映了电磁环网的强弱,如典型弱环网和弱环网 I 型的耦合度为 100%,属于典型的强耦合电磁环。

以 500 kV/220 kV 电磁环网为例,考虑一般情况:500 kV 主干通道潮流为 1 000~2 000 MW,正常方式下潮流转移主路径上单台 500 kV 主变供电裕度为 300 MW(两台合计 600 MW)、单回 220 kV 线路输电裕度为 100~200 MW;主干通道故障后,向下穿越功率的 80%~90%通过上述 500 kV 主变,15%~30%穿越上述单回 220 kV 线路,若需控制潮流下穿主路径上的元件不过载,则耦合度应小于 20%~30%。具体数值与网络结构、运行方式等有关。考虑实际电网的不均衡性并结合运行经验,耦合度小于 20%可认为是弱耦合型电磁环网,运行风险小,大于 40%可认为是强耦合型电磁环网,运行风险大。

2.2 潮流转移

电磁环网面临的普遍问题是主干通道故障后潮流转移导致下级电网过载^[2]。故障前上、下级电网元件潮流方向一致时,故障后下级元件潮流将增大,反之将减少甚至逆转,可分别定义为顺向和逆向潮流方式。针对实际电网的运行风险,以下因素需要重点关注:强耦合、大潮流、低裕度(顺向)。

由于上、下级电网的输电能力可相差 3~6 倍(如根据线型不同,500 kV 线路约为 1 600~3 500 MW,220 kV 线路约为 200~700 MW),对于强耦合的弱环网,一般受投资、廊道、站址、环保、短路水平等因素制约,通过增强下级电网来消除对上级电网输电能力的约束不经济甚至不可行,优先加强上级电网既能显著提升输电能力,也可对环网解环和结构优化创造条件。

图 2 给出了典型弱环网的运行实例:A 区位于末端,仅通过同杆 500 kV 线路和两回小截面 220 kV 线路与 B 区主网相连。500 kV 线路同跳后

系统阻抗将变为原来的数倍,存在功角失稳、电压失稳和 220 kV 线路过载问题,以及连锁故障或检修方式下的孤网风险^[15],对安全稳定装置严重依赖。随着 A 区水电和新能源的快速增长,外送缺口将从目前的 600 MW 增加到 2 500 MW 左右。研究表明:增强 220 kV 电网仅能将外送能力提升约 200~500 MW,而新建一回 500 kV 通道可将外送能力提升 1 200 MW(合环)/2 000 MW(解环)以上。

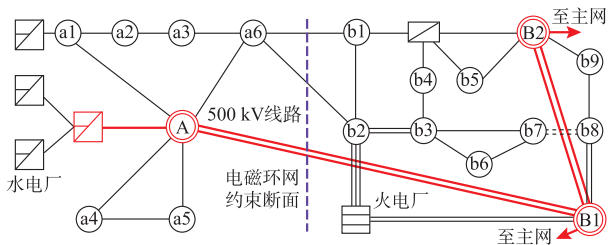


图 2 典型弱环网实例

Fig.2 Example of typical weak loop network

图 3 给出了弱环网 I 型的运行实例:A 站的单台 500 kV 主变和 A、B 站间三回 220 kV 联络线(一回停备以控制短路水平,黑虚线表示)成为制约 A 区供电能力和双回 500 kV 线路输电能力的瓶颈,特别是 A、B 站之间直连的 220 kV 短线路显著提升了近区 220 kV 系统短路水平。因此,增加 A 站 500 kV 主变等元件以便解开该电磁环网,并辅以 A 站中压侧母线分列运行、增大 A 区内部的电气距离等措施,是控制整个系统短路水平、消除输供电瓶颈的有效措施。

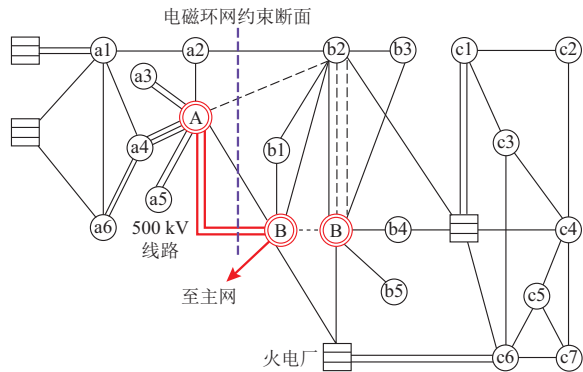


图 3 弱环网 I 型实例

Fig.3 Example of weak loop network type I

如何补强或优化上级电网较强的电磁环网结构需具体分析,如:将解环的环网显然不宜再加强下级联络断面;已明确不解环的环网则应适当加强下级联络断面;耦合度较高的环网仍宜优先增强上级网络以解决主要矛盾;耦合度较低的强环网则应重点考虑控制短路水平、简化网络结构、优化潮流分布等。三级电磁环网和两级电磁环网的特性并无本质

不同,但还需考虑以下运行风险。

1)由于输送容量有数量级的差距,最高一级小比例的潮流转移也可能导致最低一级元件过载,如特高压南荆线跳闸后其功率穿越下级部分小截面 220 kV 线路的比例达 2%~3%,220 kV 单线承担的穿越功率达 100 MW 左右,顺向潮流方式下有过载风险;第二级电网主要元件检修时上述风险将成倍放大。

2)运行涉及三个调度层级,管理和协调复杂,易给电网安全运行带来隐患,特别是最低一级电网的检修可能影响最高一级电网的安全运行。

3)特高压线路往往是跨区跨省输电主干通道,影响面大,原则上应与地区电网运行解耦(这一点对于处于重要主干通道上的电磁环网同样有效)。

2.3 稳定和短路

存在失稳风险的电磁环网主要是承担大功率外送或向末端供电的强耦合型电磁环网,特别是典型弱环网。上级主干通道故障后仅剩下级输电通道,系统阻抗为故障前的数倍(如 3~5 倍),易导致功角失稳;另一方面受端失去主要支撑,易导致电压失稳^[2]。当上级电网存在两个及以上输电通道时,电磁环网的存在减小了系统整体阻抗,因而并不一定会对系统稳定产生负面影响,需要结合网络结构具体分析^[16]。

影响系统短路水平的主要因素为电源规模和网络阻抗,电磁环网的存在降低了系统短路阻抗,但未必是影响短路水平的决定性因素:对于下级电气距离较长、联系不够紧密的电网,电磁解环抑制系统短路水平的效果一般只有 0.5~3.0 kA;反之,对于下级电气联系非常紧密的电网,电磁解环抑制系统短路水平的效果可达 3~6 kA 甚至更高,对于诸如两个 500 kV 站中压侧短线直连(见图 3)的极端情况,解环后两站中压侧短路电流可下降 10 kA 以上。此外,电磁环网对于上级电网的短路水平影响较小(如 1 kA 左右)。

另一方面,由于上、下级电网的短路容量存在巨大差异,上级对下级电网注入的短路电流较大,联络变压器(简称联变)中压侧往往成为下级电网短路水平控制节点。以某电网为例:一台 750 MVA 或 1 000 MVA 主变对其 220 kV 侧母线提供的三相短路电流分别可达 7~13 kA 或 9~15 kA(考虑负荷的马达效应)。因而,变电站中压侧母线分列运行可显著降低系统短路水平,这与电磁环网关系不大。

因此,短路水平控制的核心仍在于合理控制分区电网规模(装机容量、负荷),电磁环网解环应服从电网合理分区的需要,而不能仅考虑局部短路控制。

2.4 电磁环网的结构优化

消除电磁环网运行风险的根本措施是实施电网解环^[17],比如 110 kV 电网基本为辐射+链式供电结构。然而,由于超高压电网输电容量大,对安全可靠要求高,较长时期内电磁环网仍将大量存在,但将通过解环分片使其结构更加简单清晰。原则上一个分区内至少应有三台联变,且与外区至少有三回上级联络线(确保检修方式下的供电安全)^[18]。

几种分区方案如图 4 所示。其中,上级两站直连的(或三站,取决于下级网络的紧密程度和供电范围)手拉手结构仍是电磁环网,但结构简单清晰,一般每站有两台主变为宜(主变过少影响供电能力,过多则中压侧短路水平易超标),可兼顾短路控制和供电能力等各方面的需求,但要求区内联络线具备足够的互供(功率交换)能力。若上级变电站不直连,则不再是电磁环网或是隐性电磁环网。

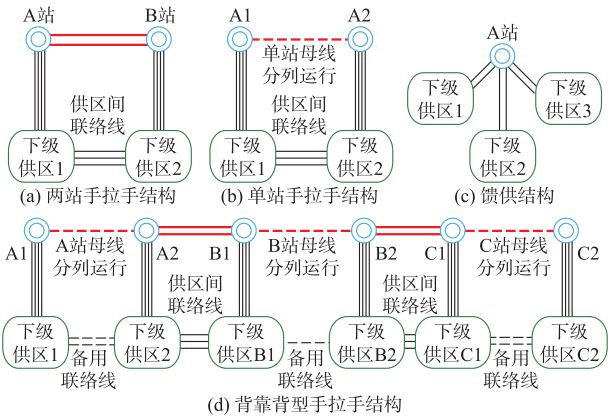


图 4 解环后的分区电网结构
Fig.4 Structures of subarea power grid after opening loops

单站手拉手结构只有一个上级变电站,但出于短路控制要求将其中压侧母线分段运行,在形式上消除了电磁环网,但仍需考虑一台联变跳闸后下级电网的潮流转移控制。这种结构往往适用于供电区域相对较小的分区电网,否则可能会出现供电距离过长的情况;且考虑变电站全停风险,其供电可靠性相对较低。

馈供结构是电磁环网彻底打开的形式,不存在电磁耦合,缺点是降低了供电可靠性,特别是母线检修方式下需足够备用联络线支持以确保供电安全,适用于供电区域和规模较小的分区电网;由于下级变电站之间缺乏互供,可能需要更高的设备冗余。

实际电网中,馈供结构较为少见,且往往会发展成为其他供电结构。值得推荐的是单站背靠背型手拉手结构,即随着单站主变的增加,变电站中压侧母线分列运行,每个分站再与其他变电站母线分列运

行后的分站形成手拉手结构,这既是出于短路控制的需,也增加了网络结构调整的灵活性,对电网发展适应性也较好。

3 电磁环网的潮流转移控制

3.1 方式预控措施

实际电磁环网运行的主要问题是潮流转移和控制。对于非连锁故障,需控制上级通道故障后下级电网任一元件有功功率不超过安全值。近似认为故障前后的有功转移特性是线性的,主要由网络结构决定,根据式(1),相关断面的预控限额表示为(具有普适性):

$$P_{lj1} = P_{hi0} \lambda_{ij} + P_{lj0} \leq P_{ljmax} \tag{2}$$

式中: P_{ljmax} 为下级线路 j 的安全功率。

对于连锁跳闸(包括故障后采取切线、切变等主动跳闸措施)的潮流控制,在线性假设下,可考虑利用叠加法求取方式预控限额。在式(2)基础上,若又发生元件 k 跳闸,则线路 j 有功功率 P_{lj2} 为:

$$P_{lj2} = P_{k1} \lambda_{kj1} + P_{lj1} \tag{3}$$

$$P_{k1} = P_{hi0} \lambda_{ik} + P_{k0} \tag{4}$$

式中: P_{k0} 为元件 k 初始有功功率; λ_{ik} 为元件 i 跳闸后向元件 k 的潮流转移比; P_{k1} 为元件 i 跳闸后元件 k 的有功功率; λ_{kj1} 为元件 i 断开方式下发生元件 k 跳闸向线路 j 的潮流转移比。

由此可以推导得出连锁故障情况下相关断面的方式预控限额为:

$$P_{lj2} = P_{hi0} \lambda_{ik} \lambda_{kj1} + P_{k0} \lambda_{kj1} + P_{hi0} \lambda_{ij} + P_{lj0} \leq P_{ljmax} \tag{4}$$

这里认为转移比 $\lambda_{ij}, \lambda_{ik}, \lambda_{kj1}$ 是固定的,可以通过离线计算程序预先求得。由于实际有功潮流的转移特性并非完全线性,考虑连锁潮流转移后计算误差将逐步扩大,特别是当上级主干通道潮流变化范围大且下级元件与上级通道的输电能力级差过大时可能产生电网安全隐患。针对这种情况,一个折中且实施相对简便的方法是分档计算方式预控限额。

对于简单型电磁环网,潮流转移特性较易分析;对于复杂型特别是多耦合点的电磁环网,其潮流转移分析可结合上级通道故障后的潮流主转移路径进行;通过联变(耦合点)的下网功率变化可以分析得出潮流转移的主要分布,从而找出需重点进行潮流控制的下级电网元件,提高运行控制的效率。

3.2 基于解耦控制的安全稳定措施

除了切机和切负荷安全稳定措施外^[19-20],实际运行中为以较小代价实现有效的潮流控制,提出了切线、切变的解列型(过渡性)特殊安全稳定措施,其核心思想是解耦控制,阻断连锁,均衡潮流,提升电网的整体稳定性,主要应用于大潮流、强耦合且结构

较强的电磁环网中:由于主干通道故障后下级电网的潮流穿越较大,此时,常规安全稳定措施往往实施困难、效果不佳甚至引发新的稳定问题,而切除潮流转移的关键联络元件可以实现或近似实现上、下级电网的解耦或潮流分布的优化。

采用此类安全稳定措施需关注以下问题。

1)上、下级电网是两点耦合还是多点耦合(复杂电磁环),前者穿越潮流最终会全部流经一个变电站或线路断面,可将解列点设于此处;后者穿越潮流流经多个断面,如有主要穿越断面则可将解列点设于此处,否则可能不宜采用解列措施。

2)对于两点耦合的情况,解列后上下级电网完全解耦,两级电网可分别分析和控制,如解列了一台主变后,近似可认为对上级电网相当于无电磁环网、对下级电网相当于发生了 $N-1$ 故障;多点耦合则不然,还需分析连锁跳闸所产生的下级电网二级潮流转移问题。

4 电磁环网运行控制实例分析

4.1 某省级电网中电磁环网分布情况

图5中字母相同而数字不同的变电站代表属于同一地区或供区。主网架可分为西部送端电网和东部受端电网。东部电网已分为5~6片独立运行手拉手型小电磁环网;西部电网整体上联网运行,并通过北部长距离220 kV线路与东部电网存在弱联系。

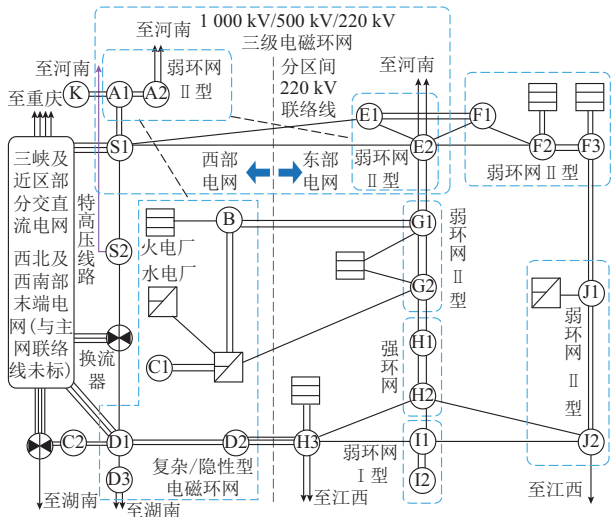


图5 某省超高压电磁环网主要分布示意图
Fig.5 Distribution diagram of a provincial extra-high voltage electromagnetic loop network

该复杂大环网包括A区等多个小电磁环网,各小环网之间存在弱联系;其结构上的另一个特点是500 kV电气相邻站点分属不同且相距较远的

220 kV供区;此外,运行上与三峡、葛洲坝外送系统耦合较强。因此,整个环网的潮流转移特性极为复杂:潮流穿越不仅存在于小环网内部,还存在于大环网的不同供区之间,甚至全省东、西部电网之间,转移路径隐蔽多变,控制难度大,风险隐患多。

4.2 典型案例分析

图5中标出了位于省间断面的1000 kV/500 kV/220 kV(准)三级电磁环网,且A1-A2为强耦合的复杂型电磁环网。首先,对三级电磁环网的潮流转移分析结果如表1所示(以断面送河南为例)。根据对多个联变下网穿越功率的分析,跨电压等级的潮流转移主路径为D至B至A,该主路径上220 kV线路的转移比在2%~3%之间,且为顺向潮流方式,方式安排中需根据特高压线路功率控制相应220 kV线路的运行裕度。

表1 特高压线路跳闸后的部分潮流转移比
Table 1 Transfer ratios of partial power flows after ultra-high voltage line tripping

元件	转移比/%	元件	转移比/%
A1站500 kV联变	-1.2	220 kV联络线 D1-B(1)	2.6
A2站500 kV联变	-8.9	220 kV联络线 C2-B(1)	2.1
D1站500 kV联变	6.1	220 kV联络线 B-A(1)	3.0
D2站500 kV联变	2.8	220 kV联络线 B-A(2)	2.3
B站500 kV联变	0.8	220 kV联络线 B-A(3)	2.0

注:(1)表示第1回线路,其他依次类推。

由于A1至A2之间的500 kV通道潮流较重,且其故障后约40%的潮流将穿越下级220 kV电网(强耦合),成为限制三级电磁环网输电能力的主要约束故障,主要潮流转移情况如表2所示。可得如下结论:①故障后下穿220 kV电网潮流的96%由A2站上网后送河南,A2站联变是穿越功率的汇聚点;②A1站是主要功率下穿点,存在过载风险;③A1-A2之间的220 kV网络是潮流的主穿越通道,但潮流分布不均,本身就重载的西通道承担了超过50%的穿越功率,多回线路易过载,而多个轻载断面组成的东通道仅承担了约35%的穿越功率,未得到充分利用。

计算表明,常规安全稳定措施代价高、效果差,且所需切负荷量难以落实,更重要的是故障后A区220 kV电网相当于串入省间输电通道中,保持这种1000 kV和220 kV电网直接耦合的电磁环网运行风险大。考虑到A2站已失去对下级电网的供电能力(功率上送),因此提出了解列A2站联变中压侧开关的过渡性特殊安全稳定措施,以切断220 kV潮流穿越的主通道,实现上、下级电网的近似解耦运行。此时相当于发生连锁跳闸,其方式预控限额可

参照 4.1 节中的算法求取。另一省间断面也存在类似的电磁环网约束环节,同样采取了 D1-D3 同杆线路 N-2 故障后解列 D3 联变的安全稳定措施。

表 2 500 kV A1-A2 通道跳闸后的部分潮流转移比
Table 2 Transfer ratios of partial power flows after 500 kV transmission channel tripping from A1 station to A2 station

元件	转移比/%	元件	转移比/%
A1 站 500 kV 联变	39	220 kV 断面 A1-A2(西 2)	24
A2 站 500 kV 联变	-43	220 kV 断面 A1-A2(西 3)	22
E2 站 500 kV 联变	-2	220 kV 线路 A1-A2(西 1)	15
K 站 500 kV 联变	7	220 kV 线路 K-A2	5
220 kV 断面 A1-A2(西 1)	24	220 kV 断面 A1-A2(东)	15

注: (西 1)表示西部断面第 1 回线路,其他依此类推。

采取上述安全稳定措施,故障后穿越 A1 联变及下级主要 220 kV 断面的功率明显减少,三级电网的整体潮流分布得到优化,上、下级电网的输电能力均得到提高。

解列型安全稳定措施的另一个案例是图 5 中 J1-J2 电磁环网,其下级有四回 220 kV 线路联络,其中的一回小截面导线是 500 kV 同杆线路同跳后潮流转移的主通道:四回线的耦合度为 29%,而小导线的转移比即达 18%,在顺向潮流方式下该线路可能严重过载,因此采用了解列该线路的安全稳定措施,从而充分发挥大截面联络线的输电能力。这种部分解列的安全稳定措施和彻底解列的安全稳定措施相比有利于保持网络结构的完整性,提高电网的安全裕度,其实质是在网络整体冗余度较高而结构严重不平衡时通过结构调整实现潮流的优化分配。

5 结语

本文系统研究了电磁环网的形态、特性、结构等,认为其主要问题在于潮流转移控制,特别是较强耦合型电磁环网的解耦控制值得关注。结合某省级电网的运行与控制实例分析了电磁环网的潮流控制方法和一种解列型特殊安全稳定措施,可为其他超、特高压电磁环网的规划、运行提供参考。针对实际电网潮流复杂多变的情况,有必要研究基于在线稳定分析系统的电磁环网(特别是复杂/隐性型电磁环网)精准控制技术手段,在确保安全的前提下进一步提升电网运行效率。

参考文献

[1] MARINAKIS A, GLAVIC M, VAN CUTSEM T. Minimal reduction of unscheduled flows for security restoration: application to phase shifter control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(1): 506-515.

[2] 孔涛,王洪涛,刘玉田,等.500 kV-220 kV 电磁环网开环研究[J].电力自动化设备,2003,23(12):13-16.
KONG Tao, WANG Hongtao, LIU Yutian, et al. On opening 500 kV-220 kV electromagnetic loop circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 13-16.

[3] 李春叶,李胜,尚敬福.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.
LI Chunye, LI Sheng, SHANG Jingfu. Comparison of operation mode of electromagnetic loop network and voltage-grading & district-dividing[J]. Journal of Electric Power, 2006, 21(2): 160-163.

[4] 王芳,何朝阳,顾南峰,等.电磁解环研究策略及广西电网开环方案研究[J].南方电网技术,2008,2(2):67-71.
WANG Fang, HE Chaoyang, GU Nanfeng, et al. Strategy for opening electromagnetic loop networks and study on the schemes for electromagnetic open rings in Guangxi power grid [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 67-71.

[5] 刘建坤,赵静波,周前,等.500/220 kV 电磁环网解合环方式评价方法研究[J].江苏电机工程,2014,33(5):1-5.
LIU Jiankun, ZHAO Jingbo, ZHOU Qian, et al. Evaluation on open/closed loop operation modes of 500/220 kV electromagnetic loop networks[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(5): 1-5.

[6] 刘明松,张健,张文朝.弱电磁环网运行控制若干问题及对策[J].电力系统自动化,2014,38(4):109-114. DOI: 10.7500/AEPS20130605006.
LIU Mingsong, ZHANG Jian, ZHANG Wenchao. Problems and countermeasures for operation and control of weak electromagnetic loops [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 109-114. DOI: 10.7500/AEPS20130605006.

[7] 白宏坤,李干生.关于电磁环网弱开环方式的探讨[J].电力系统保护与控制,2010,38(2):60-63.
BAI Hongkun, LI Gansheng. Discussion on weak open-loop mode of electromagnetic loop[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 60-63.

[8] 刘楠,唐晓骏,张文朝,等.特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(2):131-136.
LIU Nan, TANG Xiaojun, ZHANG Wenchao, et al. Study on electromagnetic ring opening in Henan province under ultra-high voltage power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 131-136.

[9] 杨冬,刘玉田.特高压初期的电磁环网影响分析[J].电力自动化设备,2009,29(6):77-80.
YANG Dong, LIU Yutian. Influence of electromagnetic loop in early ultra-high voltage grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 77-80.

[10] 李晨光,汤涌,李柏青.川电东送通道的电压水平对系统稳定性的影响[J].电力系统自动化,2003,27(9):62-65.
LI Chengguang, TANG Yong, LI Baiqing. The impact voltage level of the transmission path from Sichuan to east China on system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 62-65.

[11] 李晨光,李柏青,汤涌.电磁环网线路无故障跳线和单永故障稳定性分析[J].电力系统自动化,2003,27(1):53-56.

- LI Chenguang, LI Baiqing, TANG Yong. Stability analysis of the tripping of line without fault and single line permanent ground fault in an electromagnetically coupled power loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 53-56.
- [12] 林伟芳,孙华东,汤涌,等.巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2010,34(7):1-5.
- LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil power grid on November 10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [13] 唐斯庆,张弥,李建设,等.海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J].电力系统自动化,2006,30(1):1-7.
- TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th—cause and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7.
- [14] 杨海涛,祝达康,李晶,等.特大型城市电网大停电的机理和预防对策探讨[J].电力系统自动化,2014,38(6):128-135.DOI: 10.7500/AEPS20130819007.
- YANG Haitao, ZHU Dakang, LI Jing, et al. A discussion on mechanism and countermeasures of blackouts in super megacity power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 128-135. DOI: 10.7500/AEPS20130819007.
- [15] LIU Yutian, FAN Rui, TERZIJA V. Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 332-341.
- [16] LI Yong, LIU Fang, CAO Yijia. Sequential design and global optimization of local power system stabilizer and wide-area HVDC stabilizing controller[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 292-299.
- [17] 中华人民共和国国家经济贸易委员会.电力系统安全稳定导则:DL755—2001[S].2001.
- [18] 姚峰,李秋燕,孙建华,等.电磁环网开环运行研究[J].华中电力,2012,25(1):57-63.
- YAO Feng, LI Qiuyan, SUN Jianhua, et al. Research on electromagnetic loop network opening operation[J]. Central China Electric Power, 2012, 25(1): 57-63.
- [19] 周野,宋晓芳,薛峰,等.电力系统不同形式紧急控制的统一分析[J].电力系统自动化,2015,39(23):165-171.DOI:10.7500/AEPS20150109008.
- ZHOU Ye, SONG Xiaofang, XUE Feng, et al. Unified analysis on different forms of emergency control in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 165-171. DOI: 10.7500/AEPS20150109008.
- [20] 丁剑,马世英,吴丽华,等.长距离输电型电网振荡中心分布及解列措施[J].电力系统自动化,2015,39(10):186-191.DOI: 10.7500/AEPS20140411003.
- DING Jian, MA Shiyang, WU Lihua, et al. Out-of-step oscillation centers distribution and islanding operation of long distance transmission interconnected power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 186-191. DOI: 10.7500/AEPS20140411003.

李 刚(1979—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统分析与运行控制。E-mail: lgjjj3@163.com

刘晓瑞(1979—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向:超、特高压交直流工程规划与设计。

孙建波(1967—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统分析与运行控制。

(编辑 万志超)

Characteristics and Case Analysis of Extra-high Voltage Electromagnetic Loop Networks

LI Gang¹, LIU Xiaorui¹, SUN Jianbo²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;

2. South Central China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: In view of the still existing extra-high voltage (EHV) and ultra-high voltage (UHV) electromagnetic loop networks, the different forms and structures of development of electromagnetic loop networks are summed up with the cases and examples in a provincial power grid. It is believed that the main risk of electromagnetic loop networks lies in the transfer and control of power flow. The degree of coupling is proposed as an index to measure the intensity and risk of electromagnetic loop networks. In terms of network structure optimization and strengthening, it is considered that the higher voltage power system should be strengthened prior to the strongly coupled weak electromagnetic loop, and the short circuit level control and structure simplifying are more important for the weakly coupled strong electromagnetic loop while multilevel electromagnetic loops should be decoupled as soon as possible. Then the typical split schemes of electromagnetic loop networks are analyzed. Since EHV and UHV electromagnetic loop networks will exist for a long period of time, practical power flow transfer control algorithms for single element trip and cascading trip of electromagnetic loop networks are elaborated. Especially, a kind of unconventional stability control measure of the fast tie-element removal strategy after serious fault is put forward to decouple electromagnetic loops and balance power flow for high-power and strong-coupling electromagnetic loop networks. The stability level and transmission ability of the electromagnetic loops are effectively enhanced. The research results have been applied in actual power grids with good effect.

Key words: electromagnetic loop networks; couple; power flow transfer; opening loop; decoupling control