

采用分布系数和相角匹配分析的电磁环网潮流监控形式

孙艳¹, 凌武能², 李如琦², 莫仕勋², 苏毅², 黄珑², 秦昕²

(1. 广西电网电力调度控制中心, 广西 南宁 530023; 2. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对切机措施下电磁环网的潮流控制形式和主要监控支路的识别问题, 提出了一种采用分布系数和相角匹配分析的电磁环网潮流监控形式。该监控形式以常规分布系数法为基础, 通过发电转移因子来消除被切机组出力对电磁环网潮流监控的影响; 根据直流潮流的观点, 利用高电压等级线路和低电压等级线路的电压相角匹配程度来识别主要监控线路。对南方某省 500 kV/220 kV 电磁环网的实例分析结果表明: 所提方法能确保电磁环网高电压等级线路断开, 并采取安全措施切除机组后, 低电压等级线路不过载, 从而在确保系统安全的前提下充分发挥电磁环网的输送能力。同时, 所提方法不需要大量计算, 仅依靠相角匹配分析就能准确识别出电磁环网的主要监控线路, 有效减轻了调度监控的工作量, 具有较高的安全预警性能。

关键词: 电磁环网; 潮流监控; 切机; 分布系数; 相角匹配

Power flow control of electromagnetic loop network based on distribution coefficient and phase angle matching analysis

SUN Yan¹, LING Wuneng², LI Ruqi², MO Shixun², SU Yi², HUANG Long², QIN Xin²

(1. Guangxi Power Grid Dispatching Control Center, Nanning 530023, China; 2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the power flow control and identification of the main monitoring branch, which are the key problems of electromagnetic loop network by generator tripping measure, a power flow control form based on distribution coefficient and phase angle matching analysis is presented. This control form is based on the conventional distribution coefficient method, eliminates the influence on power flow control caused by the generator tripping through generation shift distribution factors, and according to the DC power flow, identifies the key monitoring line by the matching degree of voltage phase angle of lines with high voltage and low voltage. Example analysis results against the 500/220 kV electromagnetic loop network in the southern province show that the proposed method can avoid overload operation on the low voltage line after the high voltage line of the electromagnetic loop network is disconnected and security measures are taken to remove the unit, thus the transmission capacity of the electromagnetic loop network can be fully enhanced under the premise of system security; moreover, the proposed method does not need too much calculation, only through the phase matching analysis, the main monitoring line of the electromagnetic loop network can be identified accurately. So, the presented way effectively alleviates the workload of scheduling monitoring and has high performance on the safety precaution.

Key words: electromagnetic loop network; power flow control; generator tripping; distribution coefficient; phase angle matching

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0022-07

0 引言

由于我国经济的迅猛发展, 电力负荷的需求逐年攀升, 电力网络的传输功率随之增大。因此, 需要不断建设高电压等级线路, 完善电网结构。在这

个不断建设和完善的过程当中, 倘若高电压等级网络比较薄弱, 而低电压等级网络又缺乏支撑力度, 无法合理解环, 那么为了电力网络的安全性和经济性, 最大程度地利用现有资源, 目前较好的解决方案就是采用电磁环网方式。

电磁环网一般是指由不同电压等级的线路通过变压器的电磁回路连接而成的环形网络^[1-2]。近年来由电磁环网引起的电力事故屡见不鲜, 因此, 众多

基金项目: “广西电网高低压电磁环网潮流分析与监控技术研究”项目资助(K-GX2013-104)

相关工作人员及学者针对这一问题进行了深入的分析 and 探讨^[3-11]。文献[3]研究了打开多个电磁环网后的功率转移问题,得到了影响功率转移的原因并提出了功率转移比的概念;文献[4]针对河南电网 500 kV/220 kV 电磁环网的母线短路电流超标问题,研究了分区模式下的解环方案;文献[5]则采用分区数指标等建立了重庆电网 500 kV/220 kV 电磁环网的多目标最优解环模型,并通过进化规划算法求解得到最优解环方案;文献[6]将复杂网络的社团结构理论运用于电磁环网中低电压等级网络的分区;文献[7]经分析指出在电磁环网不具备完全解环的条件下,可以采取弱开环的过渡方式。以上研究主要围绕如何解环来展开讨论,没有涉及电磁环网方式下的运行控制问题。文献[8]以系统联变下送潮流不超过稳定极限为前提条件,求解电磁环网方式下的机组最优调用顺序,从而达到准确控制联变潮流和降低煤耗率的目的;文献[9]指出弱电磁环网的高电压等级线路结构薄弱、中低电压等级线路电气距离长等特点,容易引起暂态稳定、电压稳定等问题;文献[10]针对电磁环网的潮流控制问题,提出采用分布系数法来提高电磁环网的功率输送能力。

在一些涉及电源送出的高低压电磁环网中,为了保障系统的安全稳定运行,常会采用联切机组的控制措施^[12-13],其目的是防止高电压等级线路开断并采用切机措施后,低电压等级线路依然过载。但是,单纯依靠简单的切机措施并不能保证低电压等级线路的安全稳定。因此,如何对此种情况进行监控是一个值得研究的实际问题。由于能够较好地适应机组和负荷等功率变化的影响,分布系数法被认为是一种有效的电磁环网潮流控制方法^[14]。实际工程中,电磁环网高电压等级线路开断后的潮流分布系数一般是在某一典型工况下通过 PSD-BPA 潮流计算软件不断调整机组出力或负荷功率使得低电压等级线路出现满载来获得。然而现实中,通过这种方式获得的满载支路并不是唯一的,倘若将这些满载的低电压等级线路都作为同一电磁环网的监控支路,那么环网结构越复杂,监控支路有可能越多,这无疑会增加调度人员的工作难度。因此,如何从多条满载支路中辨别出关键支路,从而减轻电力监控负担,提高电磁环网的监控效率,也是一个值得研究的问题。

针对上述问题,本文提出了一种电磁环网的潮流监控形式,它以分布系数法和直流潮流分析理论为基础,通过发电转移因子来剔除被切机组出力对故障前高低压线路潮流的影响,通过高电压等级线

路和低电压等级线路的电压相角匹配程度来辨识主要监控线路,从而解决了切机措施下的电磁环网潮流监控问题。

1 电磁环网潮流控制的分布系数法

针对高低压电磁环网的潮流监控问题,分布系数法的控制形式为

$$L_d + aL_h \leq L_d^{\max} \quad (1)$$

式中: L_h 、 L_d 分别为高电压等级线路和低电压等级线路的潮流值; L_d^{\max} 为低电压等级线路的热稳极限值(40℃); $a \in (0,1)$ 表示分布系数,在潮流监控时为常数。

借助 PSD-BPA 潮流计算软件求取分布系数 a 的方法为:针对某个运行工况,不断调整电磁环网的关联机组或负荷的功率大小,使得高电压等级线路断开后,低电压等级线路刚好达到其热稳极限 L_d^{\max} 。通过高电压等级线路断开前的线路潮流值 L_H 、 L_D 和 L_d^{\max} 即可得到分布系数为

$$a = (L_d^{\max} - L_D) / L_H \quad (2)$$

由以上分析可知,常规分布系数法还没有考虑到切机措施对电磁环网潮流监控形式的影响。

2 配合切机措施的电磁环网潮流控制形式

基于分布系数法,考虑切机影响的电磁环网潮流控制形式为

$$(L_d - b_d G) + a(L_h - b_h G) \leq L_d^{\max} \quad (3)$$

式中: L_h 、 L_d 、 L_d^{\max} 和 a 的定义同式(1); G 表示被切机组对电磁环网的注入功率; b_h 、 b_d 表示发电转移因子,在潮流监控时为常数。

借助 PSD-BPA 潮流计算软件求取 b_h 、 b_d 值的方法是:针对某个运行工况,调整电磁环网关联机组的出力变化 ΔG ,记录高电压等级线路和低电压等级线路的有功潮流变化值 ΔL_h 和 ΔL_d ,然后通过式(4)、式(5)求得。

$$b_h = \Delta L_h / \Delta G \quad (4)$$

$$b_d = \Delta L_d / \Delta G \quad (5)$$

式(3)的物理意义为:在正常方式下,按该公式对高低压电磁环网的潮流进行调度监控,可以保证当高电压等级线路 L_h 跳闸,采取安全措施切除机组 G 后,低电压等级线路 L_d 不出现过载情况。可见,发电转移因子有效剔除了被切机组出力对电磁环网潮流监控的影响。式(3)的控制运行区域如图 1 所示,图中阴影四面体的表面及内部所构成的区域即为配合切机措施的电磁环网潮流控制区域。

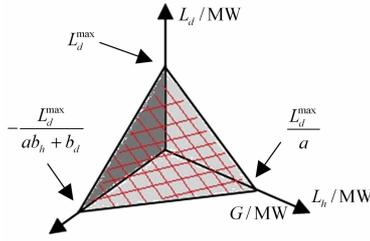


图 1 切机措施下的电磁环网潮流控制区域

Fig. 1 Power flow control area of the electromagnetic loop network by generator tripping

在式(3)中：如果令 $L_d = 0$ ，则可得到电磁环网的高电压等级线路 L_h 和被切机组出力 G 的控制关系，即

$$L_h \leq \left(\frac{b_d}{a} + b_h\right)G + \frac{L_d^{\max}}{a} \quad (6)$$

如果令 $L_h = 0$ ，则可得到电磁环网的低电压等级线路 L_d 和被切机组出力 G 的控制关系，即

$$L_d \leq (ab_h + b_d)G + L_d^{\max} \quad (7)$$

如果令 $G = 0$ ，则可得到电磁环网的低电压等级线路 L_d 和高电压等级线路 L_h 的控制关系，即

$$L_d \leq -aL_h + L_d^{\max} \quad (8)$$

显然，式(8)的控制关系等同于式(1)，即没有考虑切机措施的常规分布系数法的电磁环网潮流监控形式。在图 1 中，该监控形式的控制区域是由纵坐标轴 L_d 和横坐标轴 L_h 所构成的平面中的阴影部分；而式(7)的控制区域则是由纵坐标轴 L_d 和横坐标轴 G 所构成的平面中的阴影部分；式(6)的控制区域是由横坐标轴 G 和 L_h 所构成的平面中的阴影部分。

结合图 1 的控制区域以及式(6)~式(8)的控制关系可以看到，配合切机措施的电磁环网潮流控制形式扩展了电磁环网的监控维度，提高了监控性能，增加了电磁环网潮流控制的可操作性，对电磁环网的潮流监控工作具有较大的指导作用。

3 基于相角匹配分析的电磁环网主要监控支路识别

由前两节的分析可知，采用分布系数法来建立电磁环网的潮流监控形式时，都要借助 PSD-BPA 潮流计算软件不断调整机组出力或负荷功率来获得满载的低电压等级线路。然而在实际操作中，这样的满载支路并不是唯一的，倘若将这些满载的低电压等级线路都作为监控支路，那么将增加电磁环网的监控难度。本文基于等相角线的潮流分析和控制方法^[15]，从故障后潮流转移的角度来对电磁环网的主要监控支路进行分析和识别。

3.1 等相角线

电磁环网的线路耦合度较高，网络联系紧密，并且由于高电压等级线路的电阻远小于电抗，因此根据直流潮流的分析理论可得到高电压等级线路的传输功率为^[16]

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} (\alpha_1 - \alpha_2) = \frac{U_1 U_2}{X} \Delta\alpha \quad (9)$$

$$P = \frac{U_1 U_2}{x \Delta L} \Delta\alpha = \frac{U_1 U_2}{x} \frac{\Delta\alpha}{\Delta L} \quad (10)$$

式中： X 表示线路电抗； U_1 、 U_2 和 α_1 、 α_2 表示线路两端的电压幅值和相角； $\Delta\alpha$ 表示线路两端的电压相角之差； x 表示短线路的单位长度电抗； ΔL 表示线路长度。

采用微分矢量来表示，式(10)可变为

$$P = \frac{U_1 U_2}{x} \frac{\Delta\alpha}{\Delta L} = -\frac{U_1 U_2}{x} \frac{\partial\alpha}{\partial L} \quad (11)$$

式中，负号表示电压相角降低的方向与潮流方向一致。根据式(11)，在电力网络中，将电压相角相等的点用虚线连接起来即可得到等相角线。等相角线总是与线路相互垂直，并且其负法线方向等同于线路功率流的方向，如图 2 所示。

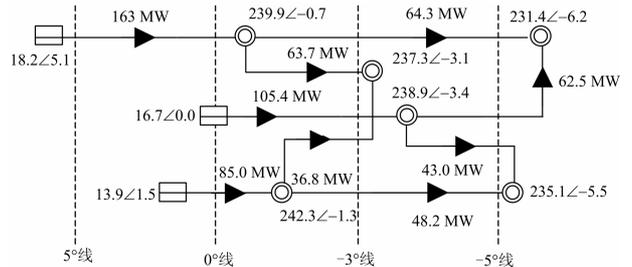


图 2 IEEE9 节点的等相角线示意图

Fig. 2 Diagram for equal-phase of IEEE 9-bus system

图 2 中，“5°线”、“0°线”等虚线即为等相角线，“ $U \angle \alpha$ ”表示每个节点的电压幅值和相角，线路上都标有功率流的大小和方向。文献[15]对等相角线进行深入分析后认为：等相角线之间的线路功率传输方向一致，并且相互之间具有较强的关联性；发生跳闸的高电压等级线路和某低电压等级线路，如果两者所跨越的等相角线重叠较大，则向该线路的转移潮流较大。

由第 1、2 节的分析可知，电磁环网潮流控制的分布系数法提高了线路的传输效率，使低电压等级线路具有较高的负载率(实际生产中接近满载)。显然，在高负载率条件下，叠加到线路上的潮流转移量越大，线路越有可能超过其稳定限额。因此，应该将获得高电压等级线路断开后的潮流转移量最大的线路，作为电磁环网潮流监控的主要支路。

针对前述潮流计算软件实验获得的多条满载支路,可以借助等相角线的以上两个结论从中辨识出获得最大转移潮流的线路,从而确定主要监控支路。然而,采用等相角线分析时,需要画出整个研究电网的等相角线图,如果网络比较庞大,那么工作量是相当大的;其次,直接做等相角线分析的方法不便于程序设计。为此,本文对等相角线的分析结论进行改进,采用相角匹配分析来识别电磁环网的主要监控支路。

3.2 电磁环网潮流转移的相角匹配分析

假设某时刻,电磁环网的高电压等级线路 h 由于故障断开,若此时 h 的两端电压相角分别为 α_{h1} 和 α_{h2} , 设 $\alpha_{h1} \leq \alpha_{h2}$, 则有相角区间 $[\alpha_{h1}, \alpha_{h2}]$, 如图3所示。若同一时刻该电磁环网内的某一低电压等级线路 d 的两端电压相角分别为 α_{d1} 和 α_{d2} , 设 $\alpha_{d1} \leq \alpha_{d2}$, 则有相角区间 $[\alpha_{d1}, \alpha_{d2}]$, 如图3所示。如果待识别的监控支路(根据分布系数法采用 PSD-BPA 潮流计算实验获得的满载支路)有 n 条, 即 $d=1,2,\dots,n$, 那么根据等相角线的分析结论, 首先定义相角符号匹配:

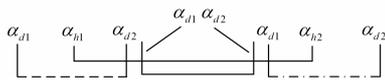


图3 相角匹配分析

Fig. 3 Phase angle matching analysis

$$\begin{cases} \alpha_{h1} \leq 0, \alpha_{d1} \leq 0 \\ \alpha_{h2} \leq 0, \alpha_{d2} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{或} \begin{cases} \alpha_{h1} \leq 0, \alpha_{d1} \leq 0 \\ \alpha_{h2} \geq 0, \alpha_{d2} \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{或} \begin{cases} \alpha_{h1} \geq 0, \alpha_{d1} \geq 0 \\ \alpha_{h2} \geq 0, \alpha_{d2} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

只要式(12)~式(14)中的某一式子成立,则表示待识别的监控支路 d 与高电压等级线路 h 之间的相角符号匹配成立。

其次,在相角符号匹配成立的基础上,根据图3,定义相角匹配度为

$$\Delta_{ah} = \alpha_{h2} - \alpha_{h1} \quad (15)$$

$$\Delta_{ad} = \alpha_{d2} - \alpha_{d1} \quad (16)$$

$$\text{或} \quad \Delta_{ad} = \alpha_{d2} - \alpha_{d1} \quad (17)$$

$$\text{或} \quad \Delta_{ad} = \alpha_{h2} - \alpha_{d1} \quad (18)$$

$$m = \frac{\Delta_{ad}}{\Delta_{ah}} \quad (19)$$

式中, m 即为电磁环网内待识别的监控支路 d 与高电压等级线路 h 之间的相角匹配度(一般用百分数表示)。其中,式(16)对应于图3中 d 为虚线的情况(简

称情况一), 即 $\alpha_{d1} \leq \alpha_{h1} \leq \alpha_{d2} \leq \alpha_{h2}$; 式(17)对应于图3中 d 为实线的情况(简称情况二), 即 $\alpha_{h1} \leq \alpha_{d1} \leq \alpha_{d2} \leq \alpha_{h2}$; 式(18)对应于图3中 d 为点划线的情况(简称情况三), 即 $\alpha_{h1} \leq \alpha_{d1} \leq \alpha_{h2} \leq \alpha_{d2}$ 。显然, m 越大, 待识别支路 d 与高电压等级线路 h 的相角匹配度越高。

相角匹配度的获取过程具体为

1) 确定高电压等级线路 h 的电压相角 α_{h1} 和 α_{h2} ;

2) 选取某条待识别的监控支路 d , $d=1,2,\dots,n$, 并确定其电压相角 α_{d1} 和 α_{d2} ;

3) 进行相角符号匹配, 验证式(12)~式(14)是否有式子成立, 如有式子成立则进入下一步, 否则结束;

4) 若属于情况一, 即 $\alpha_{d1} \leq \alpha_{h1} \leq \alpha_{d2} \leq \alpha_{h2}$, 则根据式(15)、式(16)、式(19)计算得到相角匹配度 m ;

5) 若属于情况二, 即 $\alpha_{h1} \leq \alpha_{d1} \leq \alpha_{d2} \leq \alpha_{h2}$, 则根据式(15)、式(17)、式(19)计算得到相角匹配度 m ;

6) 若属于情况三, 即 $\alpha_{h1} \leq \alpha_{d1} \leq \alpha_{h2} \leq \alpha_{d2}$, 则根据式(15)、式(18)、式(19)计算得到相角匹配度 m 。

综上所述, 在符合相角符号匹配的条件下, 待识别支路 d 与高电压等级线路 h 的相角匹配度越高, 线路 h 由于故障断开后向线路 d 的转移功率越大, 因而越应该重点监控。

4 实例分析

以南方某省 500 kV/220 kV 电磁环网为例, 检验配合切机措施的分布系数法在潮流控制中的有效性, 同时, 检验相角匹配分析方法对电磁环网主要监控支路的识别准确性。

4.1 切机措施下的分布系数法在电磁环网潮流控制中的有效性验证

南方某省 500 kV/220 kV 电磁环网如图4所示, 图中粗线表示 500 kV 高电压等级线路。

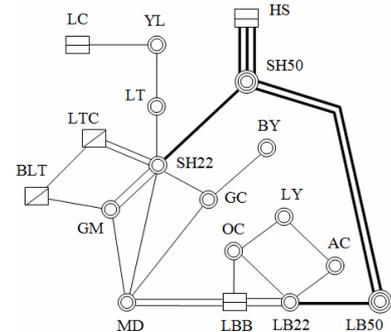


图4 南方某省 500 kV/220 kV 电磁环网

Fig. 4 500 kV/220 kV electromagnetic loop network of one southern province

4.1.1 切机措施下的电磁环网潮流控制形式

为了获得电磁环网的潮流控制形式，以该省电网某日高峰和低谷运行方式数据为基础，首先确定分布系数：借助 PSD-BPA 潮流计算软件，调整 HS 电厂#1、#2 机组出力 660 MW，#3 机组出力为 0，则 500 kV SH50-LB50 双线和 220 kV GM-MD 线有功分别为 480.14 MW 和 150.21 MW，此时若对 500 kV SH50-LB50 双线作短线模拟，220 kV GM-MD 线刚好满载(稳定限值 320 MW)。因此，根据式(2)，分布系数为

$$a = (320 - 150.21) / 480.14 = 0.3536 \quad (20)$$

其次，求取发电转移因子。根据 HS 电厂#3 机组对电磁环网线路潮流的影响(如表 1 所示)，以表 1 中的高峰工况 1 和高峰工况 2 为数据基础(也可以根据表 1 中其他工况数据)，通过式(4)、式(5)即可计算得到发电转移因子为

$$b_h = (1039.58 - 949.9) / (624 - 524) = 0.8968 \quad (21)$$

$$b_d = (167.66 - 164.9) / (624 - 524) = 0.0276 \quad (22)$$

最后，根据式(20)~式(22)求得的分布系数和发电转移因子，再结合式(3)，便可得到切机措施下的电磁环网潮流监控形式为

$$(L_d - 0.0276G) + 0.3536(L_h - 0.8968G) \leq 320 \quad (23)$$

表 1 HS 电厂#3 机组对线路潮流的影响

Table 1 Influence of the HS plant #3 unit on the power flow

运行工况	HS 电厂#3 机组 出力/MW	500 kV	220 kV
		SH50-LB50 双线/MW	GM-MD 线/MW
高峰工况 1	624	1 039.58	167.66
高峰工况 2	524	949.90	164.90
高峰工况 3	424	860.18	162.13
高峰工况 4	324	770.48	159.36
低谷工况 1	624	1 184.86	117.02
低谷工况 2	524	1 095.24	114.21
低谷工况 3	424	1 005.62	111.41
低谷工况 4	324	915.98	108.62

4.1.2 电磁环网潮流控制形式的有效性验证

以表 1 中的四种高峰工况和四种低谷工况为数据基础验证式(23)的有效性，结果如表 2 所示。表 2 中的“式(23)计算值”表示将表 1 中的任意工况值直接代入式(23)计算得到的潮流值；“断线模拟值”指的是，在表 1 中的任意工况下，借助 BPA 潮流计算软件，断开 500 kV SH50-LB50 双线并切除 HS 电厂#3 机组后得到的 220 kV GM-MD 线潮流值；“误差”表示：(式(23)计算值-断线模拟值)/断线模拟值。

表 2 监控形式的有效性验证结果

Table 2 Validation results of the monitoring form

运行工况	式(23)计算值/MW	断线模拟值/MW	误差/%
高峰工况 1	320.16	320.00	0.049
高峰工况 2	320.16	320.00	0.049
高峰工况 3	320.13	320.00	0.042
高峰工况 4	320.12	320.00	0.036
低谷工况 1	320.89	320.00	0.278
低谷工况 2	320.86	320.00	0.269
低谷工况 3	320.84	320.00	0.263
低谷工况 4	320.83	320.00	0.258

由表 2 可以看到，采用式(23)来对该电磁环网进行潮流监控时，在表 1 的任意工况下高电压等级线路 SH50-LB50 跳闸，采取安全措施切除 HS 电厂#3 机组后，低电压等级线路 GM-MD 都不会过载，显示了良好的控制效果。同时可以看到，不论对于高峰工况还是低谷工况，采用式(23)的直接计算值与断线模拟值的误差都在 1%以内，表明该监控方法不仅具有较高的控制准确性，而且还具有较强的监控适应性。

4.2 相角匹配分析方法在电磁环网主要监控支路识别中的有效性验证

针对图 4 的电磁环网，以该省电网某日正常运行方式数据为基础，运用分布系数法，通过 BPA 潮流计算软件进行多次实验(调节不同的电厂机组出力、不同的线路停电检修)后，断开高电压等级线路 SH50-LB50 双线得到的满载支路为：SH22-MD 线、LB22-OC 线、OC-LY 线、SH22-LT 线、LT-YL 线。最理想的情况是将以上满载支路都作为监控支路，但电磁环网规模越大，网络越复杂，这样的满载支路将越多，无疑为调度监控与决策带来困难。现将以上满载支路作为待识别支路，通过相角匹配分析从中辨识出关键支路。

借助 BPA 进行断线模拟：首先在 LB22-AC 线停运的条件下，在该日 0 时断开 500 kV SH50-LB50 双线(0 时相角区间为[-12.2, -9.4])，此时的满载支路为 SH22-MD 线；其次在 LBB-OC 线停运的条件下，在该日 12 时断开 500 kV SH50-LB50 双线(12 时相角区间为[-12.3, -10.7])，此时的满载支路为 OC-LY 线。在和以上断线模拟相同的条件下，采用式(12)~式(19)进行相角匹配分析，结果如表 3、表 4 所示。

表3 待识别支路的相角匹配分析结果(0时)

Table 3 Results of the phase angle matching analysis to identify the lines (0 o'clock)

待识别支路	相角区间(°)	是否相角符号匹配	匹配度/%
SH22-MD 线	[-11.2, -9.4]	是	64.3
LB22-OC 线	[-12.8, -11.2]	是	35.7
OC-LY 线	[-14.7, -12.8]	是	0
SH22-LT 线	[-13.6, -11.2]	是	35.7
LT-YL 线	[-13.6, -11.7]	是	17.9

表4 待识别支路的相角匹配分析结果(12时)

Table 4 Results of the phase angle matching analysis to identify the lines (12 o'clock)

待识别支路	相角区间(°)	是否相角符号匹配	匹配度/%
SH22-MD 线	[-12.7, -11.4]	是	56.3
LB22-OC 线	[-10.6, -9.2]	是	6.3
OC-LY 线	[-12.1, -10.6]	是	93.8
SH22-LT 线	[-14.3, -12.7]	是	0
LT-YL 线	[-14.3, -11.7]	是	37.5

从表3和表4可以看到,在相角符号匹配的基础上,0时与500 kV SH50-LB50 双线匹配度最高的是SH22-MD线,12时与500 kV SH50-LB50 双线匹配度最高的是OC-LY线。可见,相角匹配分析的结果与BPA断线模拟的结果高度一致,显示了较高的识别准确性。同时,不依靠BPA潮流计算,仅根据高电压等级线路的当前电压相角,采用相角匹配分析方法,便可知道此时高电压等级线路断开后极有可能满载的支路。显然,相角匹配分析方法减轻了调度监控的工作量,具有较强的辨识灵敏性和安全预警性能。

5 结论

本文采用配合切机措施的分布系数法和相角匹配分析方法对电磁环网的潮流监控和关键线路识别进行了分析和讨论。结合实例分析的结果,得到以下结论。

(1) 分布系数法能够提高电磁环网的输电能力,对电磁环网的潮流监控具有较强的适应性。

(2) 切机措施下的分布系数法通过发电转移因子剔除了被切机组出力对潮流监控的影响,增加了电磁环网潮流监控的可操作性,扩展了监控维度。

(3) 相角匹配分析具有较高的识别准确度,分析得到的主要监控支路与BPA断线模拟一致,同时计

算简单,可有效运用于电磁环网的潮流监控预警。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ZHANG Ning, YE Hua, LIU Yutian. Decision support for choosing optimal electromagnetic loop circuit opening scheme based on analytic hierarchy process and multi-level fuzzy comprehensive evaluation[J]. Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications, 2008, 16(4): 183-191.
- [3] 周专,姚秀萍,王维庆,等.基于多电磁环网的功率转移研究与分析[J].电力系统保护与控制,2013,41(22):134-140.
ZHOU Zhuan, YAO Xiuping, WANG Weiqing, et al. Research and analysis of power transfer based on multiple electromagnetic looped network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 134-140.
- [4] 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):135-141.
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): 135-141.
- [5] 唐文左.电磁环网的最优解环方法研究[D].重庆:重庆大学,2013.
TANG Wenzuo. Study on the optimum opening method of electromagnet loop network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [6] 杨冬,刘玉田.基于网络社团结构特性量化分析的电磁环网分区方法[J].电力系统自动化,2013,37(21):66-71.
YANG Dong, LIU Yutian. A new method for electromagnetic loop partitioning based on quantitative analysis of network community structure characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 66-71.
- [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): 78-82.
- BAI Hongkun, LI Gansheng. Discussion on weak open-loop mode of electromagnetic loop[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 78-82.
- [8] 李佳宇, 李大鹏, 孙素琴, 等. 节能调度环境下电网分层、分区潮流自动控制策略的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 97-102.
- LI Jiayu, LI Dapeng, SUN Suqin, et al. Design and implementation of automatic power flow control for voltage-grading and district-dividing under the condition of energy-conservation power generation dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 97-102.
- [9] 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.
- 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.
- [10] 孙艳, 李凌, 邓秋荃, 等. 基于分布系数法的电磁环网潮流控制形式研究[J]. 广西电力, 2012, 35(4): 1-4.
- SUN Yan, LI Ling, DENG Qiuquan, et al. Study on power flow control form of electromagnetic loop circuit based on distribution factor method[J]. Guangxi Electric Power, 2012, 35(4): 1-6.
- [11] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 特高压同杆双回线的环流不平衡及其影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 202-208.
- LI Bin, LI Xuebin, DING Maosheng, et al. Circulating unbalanced current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 202-208.
- [12] KARADY G G, GU J. A hybrid method for generator tripping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1102-1107.
- [13] KARADY G G, KATTAMESH M A. Improving transient stability using generator tripping based on tracking rotor-angle[C] // Winter Meeting of the IEEE-Power-Engineering-Society, New York, 2002.
- [14] 徐岩, 吕彬, 林旭涛. 潮流转移识别方法的研究与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 411-416.
- XU Yan, LÜ Bin, LIN Xutao. Study and analysis on identification method of power flow transferring[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 411-416.
- [15] 王康, 唐陇军, 秦康平. 利用等相角线的电网潮流转移分析与潮流控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 117-122.
- WANG Kang, TANG Longjun, QIN Kangping. Power flow transfer analysis and power flow control using equal-phase line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 117-122.
- [16] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

收稿日期: 2014-11-19; 修回日期: 2014-12-16

作者简介:

孙艳(1983-), 男, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制;

凌武能(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究电力系统最优潮流及稳定分析; E-mail: lingwuneng@163.com

李如琦(1959-), 女, 教授, 研究方向为电力系统最优运行与规划。

(编辑 葛艳娜)