

基于DSR的电力系统重合闸及紧急控制匹配优化算法

陈 彧^{1,2}, 刘怀东², 王曦冉³, 王 迪²

(1. 国网山东省电力公司济南供电公司, 济南 250012; 2. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 杭州 310008)

摘要: 文中以能源互联网为研究背景,以电力控制系统为研究目标,基于DSR的量化分析,分别对最优重合闸和最优紧急控制进行研究。按照故障类型的不同选择最佳组合的控制策略。通过选择安全性和经济性最佳的紧急控制方案,利用波形叠加原理,将重合闸失败的二次冲击叠加在紧急控制作用后的系统中,使重合冲击有利于最大功角差的快速收敛,并使系统快速恢复稳定状态。文中还分别就对称和非对称性故障的算例进行比对研究,数据验证了最优重合闸紧急控制匹配优化算法的有效性和实用性。该算法有利于实现电力系统控制网络与其他互联网络的可靠互联,达成整个能源生态系统的良性发展。

关键词: 能源互联网; 动态安全域; 重合闸; 紧急控制; 最优时间; 匹配优化

Matching Optimization of Power System Reclosing and Emergency Control Based on DSR

CHEN Yu^{1,2}, LIU Huaidong², WANG Xiran³, WANG Di²

(1. State Grid Jinan Electric Power Company, Jinan 250012, China; 2. State Key Laboratory of Smart Grid, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Grid Zhejiang Economic Research Institute, Hangzhou 310008, China)

Abstract: Based on the quantification analysis of DSR, to take the energy internet as the research background and the power control system as the research object, the paper studies the optimal reclosing and emergency control respectively. According to different fault types to choose the best combination of control strategy, through selecting the best security and economic emergency control program, using the principle of wave superposition, the two impulse of the reclosing failure is superimposed on the system after emergency control, and to make the coincidence impact in favor of the convergence of the maximum angle difference and make the system quickly restore stable state. In this paper, a comparison study is carried out on the case of symmetric and asymmetric faults, and the data verified the validity and practicability of the method of matching optimization of power system reclosing and emergency control based on DSR. Algorithm is conducive to the reliable interconnection of the power system control network and other interconnected network, and to achieve the healthy development of the entire energy ecosystem.

Key words: energy internet; dynamic security region; reclosing; emergency control; the optimal time; matching optimization

0 引言

在第三次工业革命的背景下,能源互联网作为新时期将不同性质的能源与互联网加以整合的新兴研究领域,具有系统可观性强、动态交互性好等特点^[1]。其中,以电力系统控制网络为主体的系统已

成为促进和约束能源互联网发展的关键因素,为进一步扩大互联范围,增加网络的内部耦合性,实现系统功率的平衡与优化,亟需解决的问题即为在新能源分布式接入下,当系统发生故障时,如何依据表征系统状态的数据,最大程度地维护系统的安全稳定运行,以确保能源互联网中的信息流、能量流、交通流的有序交互^[2-5]。

收稿日期:2017-01-13; 修回日期:2017-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51337007)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51337007).

由于系统故障引起的发电机组间功角差过大,致使系统失步解列的问题,已成为高压大电网中极为常见的稳定性事故。当电网故障产生的扰动冲击引起系统机组间的功角差不断增大,将会对电网的暂态稳定性构成极大威胁。为了使电网在尽可能短的时间内恢复稳定,一般可采用重合闸或紧急控制等控制措施辅助系统恢复正常运行。文[6-7]指出,基于暂态稳定,可以找到一个最适合进行重合闸的时间点,在该点进行动作不仅可以减小冲击对系统稳定的影响,还可以发挥重合闸产生阻尼的抑制作用,使之有助于系统状态趋于稳定。现阶段,自动重合闸尚未实现故障类型的可靠识别,当其误重合于永久性故障时,将会对电网运行带来二次扰动,甚至加剧系统的不稳定程度。文[6]提出了一种基于暂态能量函数的重合闸最优时间计算方法,该方法从暂态能量函数的角度提出重合闸时间对系统稳定性的量化影响,但由于能量函数涉及的计算量较大,求解过程繁琐且可行解不全,故而在实际应用中具有一定的局限性。此外,传统的紧急控制方式很少在时间维度进行优化,即考虑紧急控制时间对暂态稳定的影响。文[8-9]从暂态能量函数角度指出,在进行紧急控制时存在最佳切负荷时间;文[10]提出了一种基于暂态电压的数学模型,可以对紧急控制量进行优化分析和数值计算;文[11]指出应将安全性与经济性同时纳入紧急控制算法的研究范围;文[12]提出了一种基于时间的紧急控制策略。

文中基于 DSR 的量化分析,对最优重合闸和最优紧急控制进行研究,克服单一化方法的局限性(重合闸盲目切除故障;紧急控制无法确定最优控制时间保证功角曲线快速收敛),并在时间维度上进行整合和优化,形成一种基于 DSR 最优重合闸及紧急控制的匹配优化新算法。该算法可以按照故障类型的不同选择最佳组合的控制策略,通过选择安全性和经济性最佳的紧急控制方案,利用波形叠加原理,将重合闸失败的二次冲击叠加在紧急控制作用后的系统中,选择合适的时间节点进行重合闸操作,并可以根据工程实际自主选择最佳控制时间点,具有实时性、快速性、经济性及安全性的特点,使重合冲击有利于最大功角差的快速收敛,并使系统快速恢复稳定状态,最大化地发挥紧急控制在保护系统稳定中的优势,以及重合闸系统快速试探性排除故障的优势,形成了对扰动系统的综合调控,有利于能源互联网下电力控制系统的良性发展。

1 基于 DSR 的最优时间重合闸方式

1.1 基于 DSR 的最优重合闸量化分析

所谓动态安全,即指注入功率作为自变量在一定范围内波动时,若发生故障并采取相应的控制措施,可以量化系统在不同故障及控制方式下的暂态稳定程度,快速判定系统状态,确保可以安全运行。对系统失稳程度的判断,既是确定系统在保护设备及重合闸设备动作后所处状态的参考,又是对重合闸动作的指导条件。DSR 稳定域边界可用超平面近似表示为

$$\mathbf{A}\mathbf{Y}=\sum_{i=1}^n A_i Y_i=1。 \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{A}$ 为给定故障状态下超平面系数向量,不随现实注入功率变化; n 表示系统有功注入节点的维数; $\mathbf{Y}=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ 为临界有功注入向量。

为了保证文中数据及论断的正确性和可靠性,选用拟合法求取系统动态安全域的参数。已知系统有功注入向量,待求取线路故障时在不同重合闸时刻的动态安全域系数矩阵。定义失稳度 M_{ins} 为

$$M_{\text{ins}}=\sum_{i=1}^n A_i Y_i=1。 \quad (2)$$

当 $M_{\text{ins}}>0$ 时,表示系统处于失稳状态;当 $M_{\text{ins}}<0$ 时,表示系统稳定,且 M_{ins} 数值越小系统的稳定程度越高。

1.2 瞬时性故障下重合闸时间对系统稳定性的影响

在瞬时故障下重合闸时间对系统暂态稳定的影响是单调的,即越短时间(保证熄弧时间)实施重合闸越有助于系统恢复暂态稳定,且受重合时间的影响很大;在系统功角差经历最大值(功角差曲线收敛的情况下)后再进行重合时,重合时间对稳定性影响较小。

1.3 永久性故障下重合闸时间对系统稳定性的影响

根据波形叠加原理,当 2 个频率、幅值、初相位均不同的波形发生叠加时,重叠区域内的幅值为 2 列波的矢量和。当电力系统重合于永久故障时,线路参数相同、注入功率基本不变、系统拓扑近似,所以产生的波动应和故障冲击是可比拟的。由此推断,多机系统故障冲击及永久性重合闸冲击对系统造成可叠加波动。系统重合闸不成功产生第 2 次冲击会与第 1 次冲击振荡相叠加。

由设定故障,经 BPA 仿真可得超平面系数矩阵,即可求得不同时刻下对应的系统失稳度,并可

绘制重合闸时间—失稳度曲线图。为保持曲线连续性,探究稳定性规律,可在计算时不考虑熄弧因素的影响。由仿真实验可得,在功角波动上升沿对应的时段引入重合闸冲击会加剧系统振荡;而在功角振荡下降沿时引入冲击可以减小功角振幅,保持系统稳定。

当发生永久性故障时,重合闸时间与系统功角稳定程度呈非单调关系,即重合闸时间存在多个极值点,相较于传统的暂态能量函数的处理方法(一般只能取到第 1 个最优极值点),安全域方法能取得重合闸时全时间域上的所有极值点,使数据流对能量流的控制更加智能化,对电力控制系统的安全稳定运行有重要的工程意义。

2 基于 DSR 的最优时间紧急控制方式

2.1 基于 DSR 的紧急控制量化分析

系统运行点与 DSR 超平面边界的相对位置是衡量系统运行状态的重要指标。若运行点处于 DSR 边界内侧,则系统运行安全;反之,则需通过采取紧急控制,使安全域迁移至运行点外侧,保障系统动态稳定。

采取切机、切负荷等紧急控制措施所得的扩展实用动态安全域(EPDSR)的临界超平面有近似平行和线性叠加的性质^[13]。单一紧急控制方式下的 EPDSR 迁移距离可以表示^[14]为

$$d_i = \frac{\left| \sum_{i=1}^n a_{li} y_{ji} - \sum_{i=1}^n a'_{li} y'_{ji} \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{li}^2}} \quad (3)$$

式(3)中: d_i 为单一紧急控制方式对应的 EPDSR 迁移距离; a_{li} 为不采取控制措施时故障超平面系数; a'_{li} 为控制后的超平面系数; y_{ji} 为不采取控制措施时系统注入功率; y'_{ji} 为采取控制措施情况下系统注入功率。同时,引入灵敏度指标,表征采取不同控制措施对系统稳定性的影响程度,并以此衡量各种紧急控制方案的有效性和经济性。当进行切机控制时,系统某节点上切除 n 台机组的灵敏度可表示^[15]为

$$\lambda_G = \frac{d_n - d_{n-1}}{P_n} \quad (4)$$

式(4)中: $(d_n - d_{n-1})$ 为单一控制方式下对应的 EPDSR 迁移距离的差值; P_n 为第 n 台机组的有功输出。当进行切负荷控制时,可用二次函数近似表示该操作对系统的影响,灵敏度即可表示为该二次函数的一阶导数^[15]。

由于不同的紧急控制措施将对应不同的最佳控制时间,即对应不同的最大超平面迁移距离。因此,在确定紧急控制方案时,应综合考虑不同措施的灵敏度及控制时间对动态安全域迁移距离的非线性影响,以使选定方案的迁移距离达到最优的同时,经济性也符合相应要求。引入经济性指标 $C(e_K)$,比较得出不同紧急控制方案 e_K 下最小经济成本为

$$\min C(e_K) = \sum_{i \in G_e} C_{Gi}(i) + \sum_{j \in L_e} C_{Lm}(j) \quad (5)$$

式(5)中: G_e 为参与紧急控制的发电机集合; L_e 为参与紧急控制的负荷集合; $C_{Gi}(i)$ 为切机紧急控制成本; $C_{Lm}(i)$ 为切负荷紧急控制成本。

依据紧急控制策略^[12],可选定最为合适的紧急控制方案,应满足的约束条件如下:

$$\text{s.t. } y \in \Omega_d(i, j, F, \tau_1, e_K); \quad (6)$$

$$M_{ins}(\Omega_d, t_e) \leq M_{insmax}(\Omega_d, t_e); \quad (7)$$

$$S_{Le} \leq S_{Ljmax}; \quad (8)$$

$$t_e \geq t_{emin} \quad (9)$$

式(6)–(9)中: i 表征故障前系统; j 表征故障后系统; F 表征故障中系统; Ω_d 为动态安全域; τ_1 为故障排除时间; t_e 为紧急控制时间; t_{emin} 为最小控制时间; M_{ins} 为系统进行紧急控制后的失稳度; M_{insmax} 为最大系统失稳度; S_{Le} 为切除的负荷总量; S_{Ljmax} 是最大的可切除负荷量^[16]。

2.2 紧急控制时间对系统稳定性的影响

当发生严重故障,发电机将先达到未失稳状态下的动能最大值,然后达到系统稳定临界点。若此时 $dV/dt > 0$,则系统将发生多摆失稳^[17-18]。大量仿真实验可证,当系统处于失稳状态下,并非越早采取紧急控制措施越有助于系统稳定,即系统稳定程度与紧急控制时间不具有单调关系。

3 紧急控制及重合闸的匹配优化

重合闸及紧急控制作为维护电力系统暂态安全的有效控制方式,对其进行综合优化,既可以提升电网的最大传输极限,又可以在故障发生时迅速采取相应组合的控制措施,增强电网内部耦合性,有效保障电力系统的稳定运行,以及以电力系统为控制核心的整个能源互联网的高效、智能、有序的互联与发展。

3.1 控制方式综合优化的依据

3.1.1 启动顺序

虽然系统存在发生多摆失稳故障的可能性,但在发生严重故障以致系统失稳时,其主要面临的是单摆失稳,即在功角差第一次摆动时角度始终保持

单调增大,并快速使系统解列。由文中2.3节可知,最优时间重合闸第一个极值点出现在第一次摆动的下降沿,但由于单摆失稳故障没有下降沿,故如果选择优先考虑进行重合闸,继而进行紧急控制的控制方式,会在面对简单失稳系统时发生拒动致使系统解列。综上应遵循以下2点原则:①故障后仍处于稳定状态的不失稳系统只启动最优时间重合闸操作;②故障后失稳的系统先进行紧急控制(100 ms级),后进行最优重合闸操作与之匹配。

3.1.2 重合闸冲击

对于瞬时性故障,重合闸将明显有助于系统恢复稳定;而对于永久性故障,不同的重合闸时间将会对系统状态产生截然不同的影响。对于永久性故障,重合闸失败后的二次短路冲击出现在系统功角差曲线的上升沿,即系统暂态势能上升阶段,则极易导致系统的功角失稳;若该二次短路冲击若出现在系统功角差曲线的下降沿,即系统暂态势能下降阶段,则有助于功角的收敛。当采用最优时间重合闸时,冲击不会使得原本稳定的系统失稳^[9]。所以在紧急控制保证系统安全的前提下,与重合闸的结合是可行的,有意义的。

3.1.3 紧急控制对重合闸的影响

将紧急控制与重合闸进行结合,需注意:采用紧急控制措施的对象是一个正在经历暂态失稳的系统,重合闸的操作在时间维度上与紧急控制相分离,对其不产生影响。当考虑最优重合闸时,在未失稳系统下,不进行紧急控制,只进行最优重合闸;当系统面临失稳时,先进行的紧急控制策略势必会对重合闸时间产生影响。由大量仿真实验可知,在设定的故障下只进行紧急控制,则原先所计算的最优重合闸时间无法直接作为参考,需要找一种新匹配方式。

3.2 分类策略的综合优化

由于网络拓扑及故障参数的差异性,2种控制方式的实时要求也不尽相同。为了实现电网控制目标明晰化、控制效率最大化及控制效果最优化,需制定一种分类的控制策略动作方法。该动作方法需适用于不同故障强度、不同故障类型的情况,其具体要求如下所述。

3.2.1 当故障类型不可识别时

1)若故障非致命,即在不进行控制的情况下系统暂态稳定,则系统仅进行重合闸在线推算及动作:①在瞬时性故障下,重合闸考虑最大熄弧时间下的快速重合闸;②在永久性故障下,由于该故障未使系统失稳,所以既可以选择不进行重合闸,至故障排除后进行人工合闸,也可以采取在最优情况下的

试探性合闸。

2)若故障是致命的,即在不采取任何控制措施的情况下将面临系统暂态失稳,则须先采取紧急控制措施,再考虑重合闸操作:①在瞬时性故障下,重合闸考虑最大熄弧时间下的快速重合闸;②在永久性故障下,则不进行重合闸动作,或者在采取紧急控制措施后根据最优重合闸—紧急控制匹配算法进行对重合闸时间的推算,选取最优时间点重合。

3.2.2 当故障类型可识别时

由于永久性故障时快速重合极易导致系统失稳,所以在无法确定故障瞬时性的情况下,应主要考虑永久性故障的情况。

1)若故障是非致命的,即在不进行控制的情况下系统暂态稳定,则在只考虑永久性故障的情况,也即只进行最优时间重合闸操作。

2)若故障是致命的,为确保系统安全,则应考虑永久性故障的情况。在采取紧急控制措施后,根据最优重合闸—紧急控制匹配算法对重合闸时间进行匹配推算。

分类策略框图见图1。

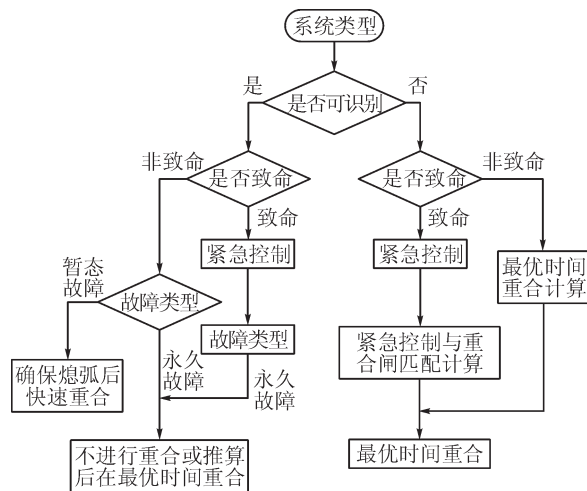


图1 重合闸—紧急控制匹配优化框图

Fig. 1 Block diagram of matching optimization for reclosing and emergency control

3.3 基于DSR的量化分析

3.3.1 匹配算法

由于一般系统未配备快速判断故障瞬时性的智能单元,且永久故障下启动重合闸对系统造成的危害极大,因此文中主要讨论系统发生致命性故障,且在启动紧急控制后重合于永久性故障下的情况。在此种情况下,为确保系统安全,必须进行紧急控制,由此制定的紧急控制及最优时间重合闸优化匹配算法如下:

1)列写发生在系统各节点母线出口处的致命性

故障,形成表 R ,为保证紧急控制应用时的快速性,所以一段线路故障后,失稳度在某一区间内则采用同一套紧急控制策略。针对同种致命故障,当同线路两端节点母线出口短路都会出现系统失稳时,需采用保证该线路最严重故障下稳定的紧急控制策略。

2)针对表 R 进行筛选,根据文中 3.2 节所描述的离线紧急控制策略制定各线路的紧急控制策略表 X 。

3)在完成各段线路的紧急控制表 $X_{i,j}$ 之后,分条提取紧急控制策略 $X_{ki,kj}$,将此单条策略作为在该故障下,该线路上的系统固定动作,对系统两端节点母线出口故障下重合闸时间不同的情况进行安全域计算,算出 6 s 内的系统安全域系数,形成系数 A_{ki}, A_{kj} ,该系数为在第 K 个紧急控制情况下, i 出口和 j 出口处母线故障时对应的 0.5~6 s 安全域系数矩阵。

4)将所有的系数矩阵及与紧急控制策略的对应关系形成表 A 。

5)实际应用下在致命故障时,查表过程为:故障→符合紧急控制策略 $X_{ki,kj}$ 应用条件→紧急控制动作→得到电网功率注入、故障在该段线路位置→代入系数 A_{ki}, A_{kj} 进行推算→绘制系统失稳度—重合闸时间曲线→判断重合闸时间。

离线计算时的参数对应情况见图 2,在线应用的推算步骤见图 3。

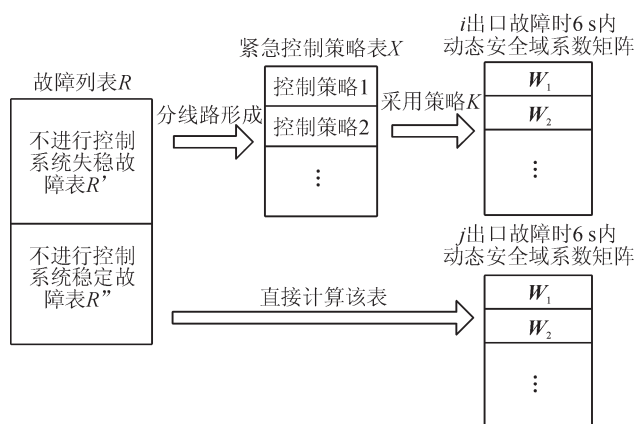


图 2 重合闸与紧急控制匹配计算

Fig. 2 Matching calculation of reclosing and emergency control

3.3.2 算法特点

1)结合性好。文中所论述的单一紧急控制优化策略及单一重合闸时间整定方法均基于 DSR 理论,采用 DSR 方法使之结合可以保证算法的统一连贯性。

2)实时性好。算法保留了动态安全域方法求取重合闸时间的所有节点,可量化、可对比、鲁棒性强,

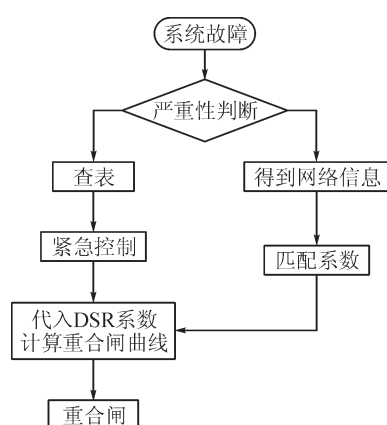


图 3 实时应用流程图

Fig. 3 Flowchart of real-time application

以实时数据为自变量,方便离线计算在线应用等。

3)逻辑性好。综合考虑多种分项措施,并使之结合紧密,自上而下形成一体。

4)连续性好。在一定故障同一故障点,无论负荷载重情况,均可灵活分析系统稳定情况,并应用不同匹配策略。

5)适应性强。由于动态安全域的理论发展中有许多新型简化计算方法,文中所描述的综合计算方法可采用解析法、降维法等方法,简化离线计算步骤。

4 算例

4.1 对称故障

以 IEEE 4 机 11 节点系统为例,设节点 1 为平衡节点。系统发生 8~10 线路 a 段节点 8 母线出口处三相短路故障,系统的注入功率 Y (单位为 MW) 为: $[y_1, y_2, y_3, y_5, y_6, y_8] = [70, 230, 248, 229, 136, 236]$,系统拓扑结构见图 4。

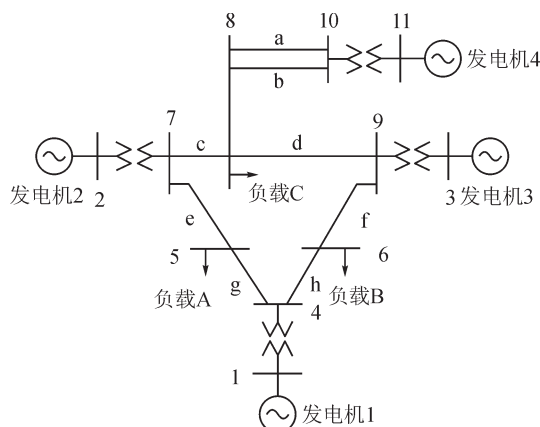


图 4 IEEE 4-11 系统图

Fig. 4 IEEE 4-11 system

当系统无法分析出是否瞬时性故障时,通过动

态安全域方法制定紧急控制策略,并离线计算出相匹配的重合闸安全域系数。由实验仿真可得,系统将处于二摆失稳状态。系统节点成本系数及最大失稳度要求见表1,按照文2节的紧急控制策略可得以下信息,见表2、3。

表1 节点成本系数及最大失稳度

Table 1 Node cost coefficient and maximum instability degree

母线 11	母线 2	母线 3	母线 5	母线 6	母线 8	ε
35.00	40.00	40.00	30.00	30.00	45.00	-0.05

表2 同等失稳度下切机切负荷量

Table 2 Capacity of generator-shedding and load-shedding when the instability degree is equal

控制方案	控制时间/s	母线 11 切机量/MW	母线 8 切负荷量/MW	迁移距离/m	失稳度 M_{us}	迁移误差/%
1	0.1	20	30	34.95	-0.092	1.49
2	0.3	10	20	30.32	-0.053	1.72
3	0.6	40	60	37.65	-0.124	2.33

表3 同等切机切负荷量下的失稳度

Table 3 Instability degree when the generator-shedding and load-shedding capacity is equal

控制时间/s	切机量/MW	切负荷量/MW	迁移距离/m	失稳度 M_{us}
0.1	10	20	14.95	0.125
0.3	10	20	30.33	-0.053
0.6	10	20	20.10	0.082

计算在文中所述预想故障下,采用紧急控制动作策略,并将控制动作作为故障过程的一部分参与重合闸安全系数的计算中。离线计算上述紧急控制表,选择控制方案2为最优控制方案,并离线计算时间域上重合闸的安全域系数见表4。

结合重合闸安全域系数及系统功率注入,即可算得在该紧急控制方案下,重合于永久故障时,重合闸时间—失稳度对应曲线。代入本算例注入功率向量 $\mathbf{Y}$,得到系统失稳度曲线,见图5。

由图5可见,若忽略重合闸熄弧条件,在紧急控制(0.3 s)之前进行重合闸操作,系统将严重偏离稳定区域;而在紧急控制之后再进行重合闸操作时,由于系统状态被紧急控制动作改变,导致重合危险性降低,但在1.5 s以前重合仍存在失稳的可能。由计算可得最优重合闸时间为1.9、3.2 s等。当在这些时间点附近重合时才能避免系统失稳解列。为了验证该算法的正确性,采用BPA仿真软件,对同一系统发生同一故障采用同种紧急控制方案的

表4 紧急控制与重合闸匹配下的动态安全域系数

Table 4 DSR coefficient of matching reclosing and emergency control

重合 闸时 间 t/s	动态安全域系数					
	母线 11	母线 2	母线 3	母线 5	母线 6	母线 8
0.2	0.561 5	0.864 1	0.815 3	-0.384 5	-0.546 9	-0.252 9
0.3	0.725 5	0.724 8	0.729 6	-0.509 7	-0.559 4	-0.270 8
0.4	0.729 6	0.718 9	0.729 1	-0.509 3	-0.559 3	-0.266 3
0.5	0.748 0	0.727 4	0.726 5	-0.520 0	-0.574 4	-0.280 2
0.6	0.748 2	0.726 8	0.726 9	-0.521 1	-0.567 0	-0.276 0
0.7	0.747 3	0.722 5	0.739 2	-0.518 3	-0.567 4	-0.279 7
0.8	0.755 8	0.730 4	0.753 0	-0.527 4	-0.577 8	-0.286 5
0.9	0.759 8	0.731 5	0.765 6	-0.528 8	-0.573 1	-0.289 2
1.0	0.772 9	0.749 7	0.769 1	-0.534 8	-0.581 1	-0.297 0
1.1	0.792 8	0.774 5	0.800 9	-0.546 3	-0.600 0	-0.326 4
1.2	0.590 3	0.620 1	0.624 1	-0.369 4	-0.403 7	-0.344 9
1.3	0.593 5	0.595 2	0.587 5	-0.349 0	-0.392 1	-0.324 5
1.4	0.608 5	0.512 0	0.090 0	-0.084 6	-0.070 5	-0.146 1
1.5	0.578 1	0.549 5	0.565 4	-0.328 0	-0.379 6	-0.298 9
1.6	0.571 6	0.539 8	0.549 2	-0.325 1	-0.375 1	-0.287 5
1.7	0.568 9	0.533 8	0.538 7	-0.321 8	-0.378 7	-0.289 0
1.8	0.553 4	0.527 1	0.539 3	-0.320 2	-0.362 5	-0.282 7
1.9	0.557 6	0.535 3	0.534 3	-0.326 3	-0.380 3	-0.288 6
2.0	0.555 5	0.526 9	0.535 9	-0.323 7	-0.376 3	-0.290 7
2.1	0.548 9	0.523 1	0.537 7	-0.322 6	-0.368 4	-0.289 4
2.2	0.541 8	0.514 1	0.548 0	-0.326 6	-0.357 4	-0.277 8
2.3	0.413 7	0.537 4	0.521 7	-0.242 3	-0.344 0	-0.141 5
2.4	0.539 6	0.476 6	0.574 3	-0.308 7	-0.225 4	-0.176 4
2.5	0.420 8	0.628 4	0.607 3	-0.300 0	-0.412 3	-0.123 2
2.6	0.463 1	0.563 8	0.577 6	-0.249 7	-0.435 1	-0.224 7
2.7	0.577 8	0.538 9	0.549 9	-0.323 1	-0.371 3	-0.289 8
2.8	0.566 1	0.533 7	0.543 5	-0.324 6	-0.367 7	-0.272 5
2.9	0.574 3	0.526 0	0.544 4	-0.330 9	-0.372 9	-0.282 6
3.0	0.558 8	0.527 6	0.534 5	-0.317 9	-0.361 5	-0.285 3
3.1	0.560 0	0.532 0	0.531 9	-0.322 5	-0.379 0	-0.281 3
3.2	0.562 6	0.529 3	0.528 6	-0.321 8	-0.375 9	-0.293 7
3.3	0.557 8	0.526 6	0.531 8	-0.326 1	-0.373 7	-0.286 5
3.4	0.549 9	0.523 7	0.535 7	-0.324 7	-0.365 8	-0.287 4
3.5	0.421 9	0.531 4	0.520 0	-0.243 6	-0.348 2	-0.137 0
3.6	0.358 1	0.645 6	0.586 3	-0.283 5	-0.312 1	-0.219 0
3.7	0.444 4	0.589 7	0.591 3	-0.283 7	-0.407 5	-0.225 6
3.8	0.504 2	0.588 0	0.563 5	-0.283 9	-0.464 4	-0.268 1
3.9	0.480 7	0.535 1	0.578 6	-0.264 6	-0.425 0	-0.248 9
4.0	0.568 3	0.526 0	0.552 1	-0.332 3	-0.367 8	-0.277 2
4.1	0.567 8	0.527 4	0.546 3	-0.329 6	-0.379 0	-0.275 4
4.2	0.560 7	0.522 6	0.552 4	-0.334 7	-0.363 0	-0.277 6
4.3	0.556 9	0.521 1	0.535 9	-0.318 2	-0.367 8	-0.275 0
4.4	0.560 0	0.519 1	0.526 2	-0.317 3	-0.364 0	-0.278 9
4.5	0.563 0	0.516 2	0.540 3	-0.326 1	-0.374 3	-0.288 5
4.6	0.558 0	0.513 4	0.543 2	-0.327 8	-0.366 5	-0.289 7
4.7	0.470 9	0.558 4	0.509 2	-0.277 3	-0.386 2	-0.187 8
4.8	0.394 6	0.607 9	0.563 0	-0.261 5	-0.331 7	-0.231 1
4.9	0.407 5	0.618 4	0.568 7	-0.284 7	-0.344 3	-0.240 0
5.0	0.486 2	0.584 7	0.573 1	-0.303 1	-0.418 4	-0.258 8
5.1	0.565 0	0.491 7	0.627 3	-0.343 0	-0.504 9	-0.244 3

情况进行验证,不难发现在不同重合闸时间下系统的稳定情况与图5表述的情况一致。以2 s进行重

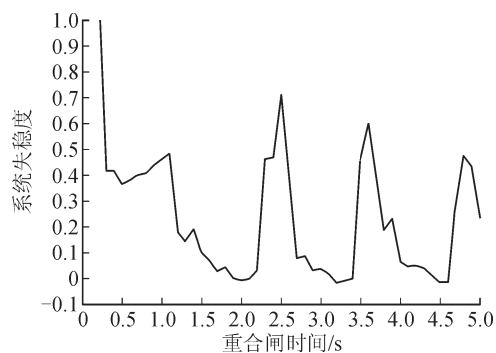


图 5 系统失稳度—重合闸时间曲线

Fig. 5 Curve of system instability degree-reclosing time

合为例,可得系统最大功角差曲线见图 6。

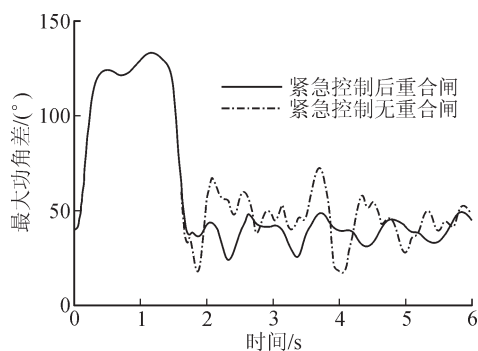


图 6 采取不同控制措施时系统最大功角差曲线

Fig. 6 Curve of the maximum angle difference of the power system under different control measures

从图 6 可知,在多摆振荡失稳的情况下,紧急控制存在最优控制条件(0.1 s 控制系统失稳);在此后功角振荡的过程中,最优重合闸重合于永久故障时系统功角曲线的收敛程度,明显优于未进行重合闸操作的功角曲线。由此可得,采用该紧急控制方法,于 1.9 s 进行重合闸操作,将有助于系统稳定,不会造成系统的失稳事故。可以证明,基于动态安全域方法的最优重合闸—紧急控制匹配优化算法是切实可行的,且可以量化求解多个极值区间以备突发情况,该算法有着良好的正确性及适应性。

4.2 非对称故障

以 IEEE 4 机 11 节点系统 8-10 线路 8 端母线出口相间短路故障为例,同理可验证该重合闸及紧急控制匹配优化算法在非对称故障情况中的应用。

根据仿真结果可分别绘制在无控制、仅进行紧急控制、紧急控制及重合闸综合控制 3 种情况下的系统最大功角差曲线。系统最大功角差曲线见图 7。在启动紧急控制及重合闸失败的情况下,不进行紧急控制及重合闸的系统将发生多摆失稳;仅采取紧急控制措施时的系统最大功角差曲线收敛,即系统保持暂态稳定;经匹配优化算法进行计算所得系统

最大功角差曲线的收敛性,明显优于其他两种情况,也验证了该算法的有效性。

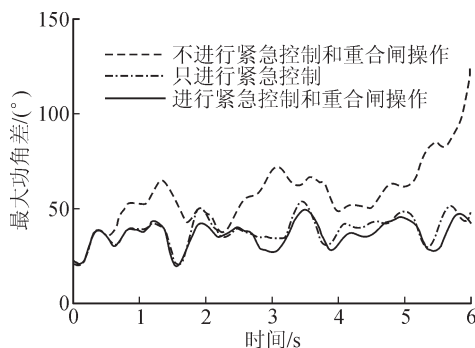


图 7 采取不同控制措施时系统最大功角差曲线

Fig. 7 Curve of the maximum angle difference of the power system under different control measures

5 结语

文中以电力系统重合闸及紧急控制这两大稳定性控制手段的匹配模型作为研究对象,通过理论分析和仿真计算,将上述基于 DSR 的最优时间重合闸计算与改进的紧急控制优化策略进行结合,提出了一种寻求时间最优解的综合匹配优化算法,并验证了该算法的正确性和实效性,适用于能源互联网下的电力控制系统,可将其作为维护系统安全稳定的有力手段,实现电力系统控制网络与其他互联网络的可靠互联,达成整个能源生态系统的良性发展。

参考文献:

- [1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与亚拟具框架[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
DONG Zhaoyang,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. From smart grid to energy internet:Basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(15):1-11.
- [2] 汤 涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术,2012,36(8):1-5.
TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012,36(8):1-5.
- [3] 黄仁乐,蒲天骄,刘克文,等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):26-33.
HUANG Renle,PU Tianjiao,LIU Kewen,et al. Design of hierarchy and functions of regional Energy Internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(9):26-33.
- [4] OTA H,KITAYAMA Y I,FUKUSHIA N,et al. Development of transient stability control system (TSC system) based on

- on-line stability calculation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(3): 1463-1467.
- [5] 王姗姗,孙华东,易俊,等. 电力系统安全稳定相关标准对大电网的适用性综述[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3144-3150.
- WANG Shanshan, SUN Huadong, YI Jun, et al. A survey on applicability of guide or code related to power system security and stability for large-scale power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3144-3150.
- [6] 张保会,袁越,薄志谦. 最佳重合闸时间及其整定计算[J]. 中国电力, 1995(2): 12-16.
- ZHANG Baohui, YUAN Yue, BO Zhiqian. Optimal reclosing time and its setting calculation[J]. China Power, 1995(2): 12-16.
- [7] 吴洋,张保会. 优化重合闸时刻的策略与效益[J]. 电力自动化设备, 2002, (8): 12-15.
- WU Yang, ZHANG Baohui. Strategy and benefit of optimizing reclosing time[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8): 12-15.
- [8] 袁宇春,张保会. 切负荷时间对系统稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(11): 10-12.
- YUAN Yuchun, ZHANG Baohui. The influence of load shedding time on power system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(11): 10-12.
- [9] 汪小明,刘涤尘,吴军,等. 基于能量函数法的电网暂态稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 114-118.
- WANG Xiaoming, LIU Dichen, WU Jun, et al. Energy function-based power system transient stability analysis[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 114-118.
- [10] 林舜江,刘明波. 暂态电压安全紧急切负荷控制优化研究[J]. 保护与控制, 2010, 38(11): 18-24.
- LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Emergency load shedding control optimization for transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 18-24.
- [11] 曹伟斌,宋依群. 电力系统预防控制的安全定价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 81-86.
- CAO Weibin, SONG Yiqun. Study on security pricing of power system preventive control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 81-86.
- [12] 王曦冉,章敏捷,邓敏,等. 基于动态安全域的最优时间紧急控制策略算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 71-77.
- WANG Xiran, ZHANG Minjie, DENG Min, et al. Optimal emergency control strategy algorithm of ideal time based on dynamic security region[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 71-77.
- [13] 李刚,王增平. 基于图论分区与改进 BFS 算法搜索安全约束集的防联锁过载控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 219-229.
- LI Gang, WANG Zengping. A control strategy to prevent cascading overload with security constraint set searched by graph theory partition and improved BFS algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 219-229.
- [14] 曾沅,余贻鑫. 电力系统动态安全域的实用解法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 24-28.
- ZENG Yuan, YU Yixin. A practical direct method for determining dynamic security regions of electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 24-28.
- [15] 余贻鑫,刘辉,曾沅. 基于实用动态安全域的紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 6-10.
- YU Yixin, LIU Hui, ZENG Yuan. A novel emergency control strategy based on practical dynamic security regions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 6-10.
- [16] 滕林,刘万顺,负志皓,等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究, 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 64-69.
- TENG Lin, LIU Wanshun, YUN Zhihao, et al. Study of real-time power system transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 64-69.
- [17] 宋方方,毕天姝,杨奇逊. 基于暂态能量变化率的电力系统多摆稳定性判别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 13-18.
- SONG Fangfang, BI Tianzhu, YANG Qixun. Multi-swing stability assessment approach based on variation rate of transient energy for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 13-18.
- [18] 顾卓远,汤涌,张健,等. 基于相对动能的电力系统暂态稳定实时紧急控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1095-1102.
- GU Zhuoyuan, TANG Yong, ZHANG Jian, et al. Real-time power system transient stability emergency control scheme based on the relative kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1095-1102.
- 陈或(1992—),女,硕士,研究方向为电力系统稳定性与安全性。
- 刘怀东(1963—),男,副教授,硕士生导师,研究方向为电力系统稳定性与安全性及电力市场等。
- 王曦冉(1989—),男,研究员,研究方向为电力安全性及电气设计。
- 王迪(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定性与安全性。