

DOI: 10.7667/PSPC150629

平行输电线路可靠性同调指标研究

刘韶峰¹, 李碧君¹, 徐泰山¹, 黄道姗², 张恒¹, 吴峰¹

(1. 南京南瑞集团公司/国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 对输电系统可靠性非同调的研究有助于提高输电利用效率和可用率。针对多回平行输电线路, 基于单重原发故障, 考虑保护拒动和相关跳闸, 分析输电线路可用率和传输容量概率分布。提出两个绝对同调指标(降额运行概率比、期望载容量比)以及一个条件同调指标(满足给定载容量概率比), 确定两回线路优于三回线路的非同调条件。对条件同调指标关于一次和二次设备可靠性参数进行灵敏度分析, 以此量化相同同调水平下, 一次和二次设备可靠性参数的换算关系。算例结果验证了所提方法的正确性。

关键词: 平行输电线路; 同调指标; 灵敏度; 可靠性; 输电系统

Research on reliability coherency indices of parallel transmission lines

LIU Shaofeng¹, LI Bijun¹, XU Taishan¹, HUANG Daoshan², ZHANG Heng¹, WU Feng¹

(1. Nari Group Corporation/Nari Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Coherency analysis of transmission reliability helps to improve its utilization efficiency and availability. For the parallel transmission lines, failure to operation, related trip, and single original fault are considered to analyze the availability of the transmission path and probabilistic distribution of available capacity. Two absolute coherence indices, i.e. ratio of probability of derated states and ratio of expected transmission capacity, and a conditional coherence index, i.e. ratio of cumulative probability at derated capacity, are newly proposed to compare coherence condition of more transmission lines. Sensitivity of conditional index to primary equipment and relay protection is derived to quantify coordination between their reliability parameters. Numerical results are provided to validate accuracy of the proposed method.

Key words: parallel transmission lines; coherence indices; sensitivity; reliability; transmission systems

0 引言

基于电力系统可靠性非同调, 当一个元件故障(修复)提高(降低)了系统可靠性时^[1-4], 这个元件称为非同调元件, 从经济性和可靠性角度而言均应予以避免。确定非同调元件, 找出非同调条件或临界参数, 对于优化系统结构、减小投资成本、提高电力系统可靠性有积极作用。

目前, 在电力系统可靠性方面的研究很多^[5-9]。关于输电系统非同调, 已有一些研究。大量分布式

电源接入电网导致配电网复杂程度增加^[10-13], 文献[2]分析了配电网中开关元件的非同调, 提出计及开关故障的配电网可靠性评估分块算法, 计算了配网中主要的可靠性指标, 分析了非同调的影响因素, 并做了原始可靠性参数对可靠性同调指标的灵敏度分析。文献[14]研究表明非同调现象不存在于发电系统中。文献[15]用拓扑分析法分析了发输电组合系统可靠性, 证明在此类系统中存在非同调现象。文献[16]分析了输电系统中多回并列运行输电线路的非同调现象, 建立了可靠性非同调的辨识模型, 提出非同调概率、非同调频率及非同调时间三个非同调指标。文献[17]从保护原理角度出发, 提出风险评估指标, 并制定评估流程对保护原理性失效进

基金项目: 国家电网科技项目(全电压序列一体化电网安全风险综合评估与可靠性管理系统研究开发)

行评估。文献[18]针对保护与控制系统动作周期短的特点, 提出瞬时状态概率解析算法以减小因评估周期造成的误差。文献[19-21]建立可靠性灵敏度模型, 解耦各元件的可靠性参数对系统可靠性指标的影响, 文献[22-23]给出了继电保护系统可靠性灵敏度的解析算法。在现有研究中, 提出的输电系统可靠性同调指标相对缺乏, 评估角度较单一, 以及对输电系统中导致非同调的情况分析不全面, 且只有文献[2]对可靠性同调指标对原始参数进行灵敏度分析。

针对输电系统中的多回平行输电线路, 本文以三回平行输电线路为例, 基于单重原发故障, 考虑保护拒动和相关跳闸, 分析了输电线路可用率和传输容量的概率分布。并在此基础上提出两个绝对同调指标: 降额运行概率比、期望载荷容量比, 以及一个条件同调指标: 满足给定载荷概率比。从三个角度评估系统同调水平, 确定两回线路优于三回线路的非同调条件。此外, 本文对满足给定载荷概率比关于一次及二次设备的原始可靠性参数进行灵敏度分析, 并以此量化了在相同的同调水平下, 一次、二次设备可靠性参数之间的换算关系。最后选取一次和二次设备的典型可靠性参数, 通过算例, 验证了算法的准确性。

1 随机故障后同调指标

图1所示输电系统由 n 条输电线路并联^[12], 在该输电系统中, 可能因为线路阻抗的不平衡限制输电电路径载荷能力, 出现非同调现象, 但上述情况在设计阶段容易被发现, 且在运行阶段一旦发现潮流载荷非同调现象后, 运行调度人员将会通过改变网络结构、调节机组出力等方法改变运行方式, 以减缓或避免非同调。非同调现象往往与线路、继电保护、断路器的动作特性和随机故障特性有关, 短时出现, 因此研究非同调的发生可能如概率、频次等指标更为重要。

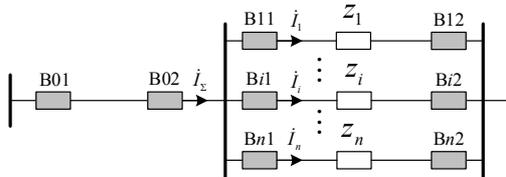


图1 并联输电线路

Fig. 1 Transmission path with parallel lines

1.1 载荷能力及概率分布

针对上述提及的可能造成非同调现象的相关因

素, 在此取三回与两回线路, 基于单重原发故障, 枚举主要运行和故障模式如图2, 并计算各状态传输容量的概率分布。

若第 i 回线路故障率为 λ_i , 修复率为 μ_i , 则可用率为 $A_i = \mu_i / (\lambda_i + \mu_i)$, 强迫停运率 $U_i = \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i) = 1 - A_i$ 。线路两端有断路器, 假设各线路断路器和继电保护型号一致, 故障后保护拒动概率为 p_R , 断路器动作失败概率 p_B 。断路器不可自行清除故障概率为 λ_B , 修复率为 μ_B , 可用率为 $A_B = \mu_B / (\lambda_B + \mu_B)$, 不可用率为 $U_B = \lambda_B / (\lambda_B + \mu_B) = 1 - A_B$ 。认为线路故障和断路器故障相互独立, 同一回线路继电保护和断路器正确动作与否相互独立。

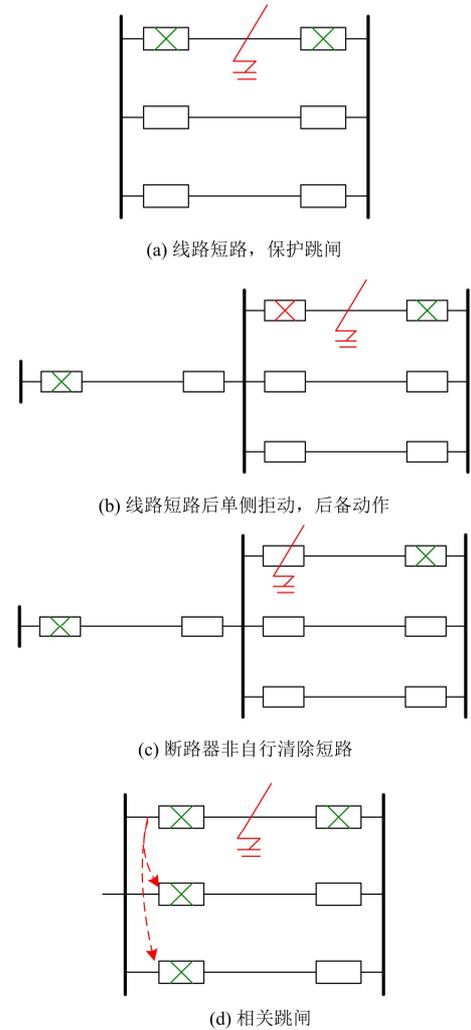


图2 单重故障后保护相关跳闸

Fig. 2 Related trip of protection after single fault

(1) 所有线路和断路器无故障发生, 所有输电线路均正常运行。

对于三回线路, 可用输电容量为 $I_3^{(0)} = 3I_{i\max}$, 概率为

$$p_3^{(0)} = [A_i A_B^2]^3 \quad (1)$$

对于两回线路, 可用输电容量为 $I_2^{(0)} = 2I_{i\max}$, 概率为

$$p_2^{(0)} = [A_i A_B^2]^2 \quad (2)$$

(2) 第 i 回线路故障, 双侧保护正确动作, 双侧断路器正确跳闸, 故障线路停运如图 2(a)。

对于三回线路, 故障发生后可用载荷能力为 $I_3^{(1)} = 2I_{i\max}$, 事件发生概率为

$$p_3^{(1)} = 3 \left[U_i (1-p_R)^2 (1-p_B)^2 A_B^2 \right] [A_i A_B^2]^2 \quad (3)$$

其中第一个中括号表示故障线路, 第二个中括号表示其他两回线路, 3 表示原发故障线路有三种可能。

对于两回线路, 故障后可用载荷能力为 $I_2^{(1)} = I_{i\max}$, 事件发生概率为

$$p_2^{(1)} = 2 \left[U_i (1-p_R)^2 (1-p_B)^2 A_B^2 \right] [A_i A_B^2] \quad (4)$$

(3) 线路 i 故障, 单侧保护拒动或断路器动作失败, 远后备保护和断路器正确动作, 输电路径所有线路停运如图 2(b)。

三回及两回线路故障后可用载荷能力均为 0, 即 $I_3^{(2)} = I_2^{(2)} = 0$ 。对于三回线路, 事件概率为

$$p_3^{(2)} = 3 \left[U_i 2(p_R + p_B)(1-p_R)(1-p_B) A_B^2 \right] \times [A_i A_B^2]^2 [(1-p_R)(1-p_B) A_B] \quad (5)$$

其中第一个中括号内 2 表示拒动可在任何一侧, 第三个中括号表示上一级线路跳闸。

对于两回线路, 事件发生概率为

$$p_2^{(2)} = 2 \left[U_i 2(p_R + p_B)(1-p_R)(1-p_B) A_B^2 \right] \times [A_i A_B^2] [(1-p_R)(1-p_B) A_B] \quad (6)$$

(4) 线路 i 某侧断路器短路, 对侧断路器动作。本侧远后备保护动作, 输电路径所有线路停运如图 2(c)。

三回及两回线路故障后可用载荷能力均为 0, 即 $I_3^{(3)} = I_2^{(3)} = 0$ 。对于三回线路, 事件发生概率为

$$p_3^{(3)} = 3 \left[2A_i U_B (1-p_R)(1-p_B) A_B \right] \times [A_i A_B^2]^2 [(1-p_R)(1-p_B) A_B] \quad (7)$$

对于两回线路, 发生概率为

$$p_2^{(3)} = 2 \left[2A_i U_B (1-p_R)(1-p_B) A_B \right] \times [A_i A_B^2] [(1-p_R)(1-p_B) A_B] \quad (8)$$

(5) 线路 i 故障, 双侧保护正确动作, 双侧断路

器正确动作, 故障线路停运。但是由于数据通信或操作电源等问题, 其他线路可能发生相关跳闸 (Sympathetic Trip) 如图 2(d)。在可靠性研究中, 相关跳闸一般被归为隐性故障范畴。

令一侧保护跳闸后, 其他线路同侧保护的跳闸概率为 p_{st} 。对于三回线路, 一回线路故障后, 正常工作线路中一回跳闸, 剩余载荷容量 $I_3^{(4,1)} = I_{i\max}$, 概率为

$$p_3^{(4,1)} = 3 \left[U_i (1-p_R)^2 (1-p_B)^2 A_B^2 \right] \times [A_i A_B^2]^2 2p_{st} \quad (9)$$

若其他两回全部跳闸, 载荷容量 $I_3^{(4,2)} = 0$, 概率为

$$p_3^{(4,2)} = 3 \left[U_i (1-p_R)^2 (1-p_B)^2 A_B^2 \right] \times [A_i A_B^2]^2 p_{st}^2 \quad (10)$$

对于两回线路, 载荷容量 $I_2^{(4)} = 0$, 事件发生概率为

$$p_2^{(4)} = 2 \left[U_i (1-p_R)^2 (1-p_B)^2 A_B^2 \right] [A_i A_B^2] p_{st} \quad (11)$$

考虑相关跳闸后, 状态(b)概率修正为

$$p_3^{(1)} = 3 \left[U_i (1-p_R)^2 (1-p_B)^2 A_B^2 \right] \times [A_i A_B^2]^2 (1-p_{st})^2 \quad (12)$$

$$p_2^{(1)} = 2 \left[U_i (1-p_R)^2 (1-p_B)^2 A_B^2 \right] \times [A_i A_B^2] (1-p_{st}) \quad (13)$$

综合考虑上述四种情况, 按照可用载荷容量, 三回线路运行状态为

$$\begin{cases} I_3 = 3I_{i\max}, p = p_3^{(0)} \\ I_3 = 2I_{i\max}, p = p_3^{(1)} \\ I_3 = I_{i\max}, p = p_3^{(4,1)} \\ I_3 = 0, p = p_3^{(2)} + p_3^{(3)} + p_3^{(4,2)} \end{cases} \quad (14)$$

两回线路运行状态为

$$\begin{cases} I_2 = 2I_{i\max}, p = p_2^{(0)} \\ I_2 = I_{i\max}, p = p_2^{(1)} \\ I_2 = 0, p = p_2^{(2)} + p_2^{(3)} + p_2^{(4)} \end{cases} \quad (15)$$

1.2 可靠性同调指标

根据 1.1 中的可用载荷容量及其概率分布, 提出三个可靠性同调指标, 即降额运行概率比、期望载荷能力比及满足给定载荷概率比。其中前两项为绝对同调指标, 最后一项为条件同调指标。

1.2.1 绝对同调指标

对比三回及两回线路的降额运行概率

$$p_3 = p_3^{(1)} + p_3^{(2)} + p_3^{(3)} + p_3^{(4,1)} + p_3^{(4,2)} \quad (16)$$

$$p_2 = p_2^{(1)} + p_2^{(2)} + p_2^{(3)} + p_2^{(4)} \quad (17)$$

将上述两式相除, 有

$$\eta_p = \frac{p_3}{p_2} = \frac{3A_i A_B^2 a_{p3}}{2 a_{p2}} \quad (18)$$

定义 η_p 称为降额运行概率比, 在式(18)中,

$$a_{p3} = U_i (1 - p_{st})^2 + 2U_i (p_R + p_B) A_B + 2U_i p_{st} + U_i p_{st}^2$$

$$a_{p2} = U_i (1 - p_{st}) + 2U_i (p_R + p_B) A_B + 2A_i U_B + U_i p_{st}$$

注意到 $a_{p3} - a_{p2} = 2p_{st}^2 U_i > 0$, 即 $a_{p3} / a_{p2} > 1$ 。

实际线路和断路器可用率, 一般情况下都可满足式(19)所列条件。

$$\frac{3A_i A_B^2}{2} > 1 \Leftrightarrow A_i A_B^2 > \frac{2}{3} \quad (19)$$

因此必然有 $p_3 > p_2$, $\eta_p > 1$, 即三回线路降额运行概率大于两回线路, 从电网事故发生可能性而言, 此为非同调。

分析期望载荷容量, 对于三回线路有

$$E(I_3) = p_3^{(0)} I_3^{(0)} + p_3^{(1)} I_3^{(1)} + p_3^{(4,1)} I_3^{(4,1)} \quad (20)$$

对于两回输电线路有

$$E(I_2) = p_2^{(0)} I_2^{(0)} + p_2^{(1)} I_2^{(1)} \quad (21)$$

两者比值为

$$\eta_l = \frac{E(I_3)}{E(I_2)} = \frac{3A_i A_B^2 a_{i3}}{2 a_{i2}} \quad (22)$$

定义 η_l 为期望载荷容量比, 在式(22)中,

$$a_{i3} = A_i + 2(1 - p_R)^2 (1 - p_B)^2 (1 - p_{st})^2 U_i + 2(1 - p_R)^2 \times (1 - p_B)^2 p_{st} U_i$$

$$a_{i2} = A_i + (1 - p_R)^2 (1 - p_B)^2 (1 - p_{st}) U_i$$

注意到

$$a_{i3} - a_{i2} = (1 - p_R)^2 (1 - p_B)^2 U_i \times (1 - p_{st} + 2p_{st}^2) > 0,$$

即 $a_{i3}/a_{i2} > 1$, 计及式(19), 必有 $\eta_l > 1$ 即载荷容量期望值也同调。但是 p_R, p_B, p_{st} 越大, a_{i3} 与 a_{i2} 越接近, A_i 与 A_B 越小, η_l 越接近于 1, 同调性越不显著。

从期望载荷能力利用比而言

$$\eta'_l = \frac{\frac{E(I_3)}{2I_{i\max}}}{\frac{E(I_2)}{2I_{i\max}}} = A_i A_B^2 \frac{a_{i3}}{a_{i2}} \quad (23)$$

式(23)中, 由于 $A_i A_B^2 < 1$, 而 $a_{i3}/a_{i2} > 1$, 因此同调与否与实际可靠性参数有关。

综合上述分析, 同型平行线路回数越多, 降额运行概率越大, 可以认为非同调。回数越多, 载荷能力越大, 保持同调, 但是输电路径载荷能力利用率未必同调。

1.2.2 条件同调指标

根据以上分析可知, 实际载荷越小, 对线路输电能力要求越低, 非同调特性未必显示出来。若实际载荷不大于两回线路最大输电能力 $2I_{i\max}$, 以其为基准, 分别计算三回和两回线路载荷容量为 $2I_{i\max}$ 时的累积概率 $p_{3(2I_{i\max})}^+$ 和 $p_{2(2I_{i\max})}^+$, 定义 $\eta_{(2I_{i\max})}$ 为满足给定载荷概率比

$$\eta_{(2I_{i\max})} = \frac{p_{3(2I_{i\max})}^+ + p_{3(2I_{i\max})}^{(1)}}{p_{2(2I_{i\max})}^+} \quad (24)$$

将式(24)中相关概率带入, 得到以原始可靠性参数表示的表达式如式(25)所示。

$$\eta_{(2I_{i\max})} = A_B^2 \left[A_i + 3(1 - p_R)^2 (1 - p_B)^2 (1 - p_{st})^2 U_i \right] \quad (25)$$

当 $\eta_{(2I_{i\max})} \geq 1$, 即 $p_{3(2I_{i\max})}^+ \geq p_{2(2I_{i\max})}^+$, 线路输电能力与其回数是同调的, 即三回线路载荷能力达到 $2I_{i\max}$ 的概率, 大于两回线路载荷满载的概率。当 $\eta_{(2I_{i\max})} < 1$, 线路输电能力与其回数是非同调的, 即三回线路载荷能力达到 $2I_{i\max}$ 的概率小于两回线路载荷满载的概率。

若实际载荷不大于一回线路最大输电能力 $I_{i\max}$, 以 $I_{i\max}$ 为基准, 同理可定义非同调指标 $\eta_{(I_{i\max})}$, 如式(26)所示。

$$\eta_{(I_{i\max})} = \frac{p_{3(2I_{i\max})}^+ + p_{3(2I_{i\max})}^{(1)} + p_{3(2I_{i\max})}^{(4,1)}}{p_{2(2I_{i\max})}^+ + p_{2(2I_{i\max})}^{(1)}} \quad (26)$$

当然, 由于没有考虑未来输电需求增长, 该指标不足以独立确定输电线路回数, 但可以作为一个辅助参考指标。

2 可靠性同调灵敏度分析及相互协调

为研究可靠性原始参数对条件同调指标的影响, 对满足给定载荷概率比做灵敏度分析, 并通过线性化其表达式, 量化相同同调水平下, 一次、二次设备可靠性参数的换算关系。

将 $\eta_{(2I_{i\max})}$ 关于元件不可用率求偏导数, 其中灵敏度系数定义如下

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_i} = A_B^2 \left[-1 + 3(1 - p_R)^2 (1 - p_B)^2 (1 - p_{st})^2 \right] \\ \frac{\partial \eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_B} = -2A_B \left[A_i + 3(1 - p_R)^2 (1 - p_B)^2 (1 - p_{st})^2 U_i \right] \\ \frac{\partial \eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_R} = -6A_B^2 (1 - p_R) (1 - p_B)^2 (1 - p_{st})^2 U_i \\ \frac{\partial \eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_B} = -6A_B^2 (1 - p_R)^2 (1 - p_B) (1 - p_{st})^2 U_i \\ \frac{\partial \eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_{st}} = -6A_B^2 (1 - p_R)^2 (1 - p_B)^2 (1 - p_{st}) U_i \end{cases} \quad (27)$$

由式(28)可知, $\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial U_B$ 、 $\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial p_R$ 、 $\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial p_B$ 、 $\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial p_{st}$ 小于零, 即断路器短路概率越大、保护和断路器拒动概率越大、保护相关跳闸概率越大, 越容易非同调。 p_R 、 p_B 、 p_{st} 中数值较大者, 对非同调影响也越大。对实际线路 $\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial U_i$ 一般大于零, 即线路故障概率越大, 越容易同调, 这是一个有些反常的结论。

将式(25)线性化, 可得

$$\Delta\eta_{(2I_{i\max})} = \frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_i} \Delta U_i + \frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_B} \Delta U_B + \frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_R} \Delta p_R + \frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_B} \Delta p_B + \frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_{st}} \Delta p_{st} \quad (28)$$

令 $\Delta\eta_{(2I_{i\max})}=0$ 得式(29)、式(30), 可量化一次元件(线路/断路器)不可用率与二次元件不可用率(p_R 、 p_B 、 p_{st})之间的换算关系

$$\Delta U_i = -\frac{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_R}}{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_i}} \Delta p_R - \frac{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_B}}{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_i}} \Delta p_B - \frac{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_{st}}}{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_i}} \Delta p_{st} = c_{iR} \Delta p_R + c_{iB} \Delta p_B + c_{ist} \Delta p_{st} \quad (29)$$

$$\Delta U_B = -\frac{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_R}}{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_B}} \Delta p_R - \frac{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_B}}{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_B}} \Delta p_B - \frac{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial p_{st}}}{\frac{\partial\eta_{(2I_{i\max})}}{\partial U_B}} \Delta p_{st} = c_{BR} \Delta p_R + c_{BB} \Delta p_B + c_{Bst} \Delta p_{st} \quad (30)$$

以上两式对一次元件和二次元件可靠性进行了折算, 即当二次元件可靠性下降时, 一次元件可靠性需要增加多少, 以维持同调水平不变。

若以 $I_{i\max}$ 为基准, 则可以式(26)同上述方法进行灵敏度以及参数换算分析。

3 计算分析

取典型数据, 检验上述模型。线路强迫停运率(FOR)为 $U_i=0.0015$, 断路器短路概率 $U_B=0.01$, 保护拒动概率 $p_R=0.0001$, 断路器拒动概率 $p_B=0.002$, 相关跳闸概率 $p_{st}=0.02$, 对应不同可用载容量的概率分布见表1。

因为原发故障只考虑单重, 遗漏了一些状态, 因此累积概率略小于1, 但是仍可得到一些定量信

息。由于未考虑计划停运, 但是计及断路器短路以及保护相关跳闸, 无论两回或三回线路, 都满足额定载荷方式概率最大, 其次是全部停电方式, 降额运行方式概率最小。

表1 多回线路输电能力概率分布

Table 1 Available capacity and probability of transmission path

$I_{i\max}$	三回线路		两回线路		η
	分布 概率	累积 概率	分布 概率	累积 概率	
3.0	0.937 2	0.937 2	/	/	
2.0	0.004 0	0.941 3	0.957 7	0.957 7	0.982 8
1.0	0.000 2	0.941 5	0.002 8	0.960 5	0.980 1
0	0.056 0	0.997 5	0.038 2	0.998 7	

三回线路降额运行方式概率之和为0.0602, 两回线路降额运行方式概率之和为0.0410, 两者比值 $\eta_p=1.468$ 。这验证了前述结论: 从电网事故发生概率而言, 三回线路比两回线路非同调。

采用概率加权, 计算三回线路载容量期望值为 $2.82I_{i\max}$, 两回线路为 $1.918 I_{i\max}$, 两回线路明显较低。但是从占输电容量比例来说, 前者为94%, 而后者为95.91%, 后者比例较高。

计算得非同调指标 $\eta_{(2I_{i\max})}=0.982848$, $\eta_{(I_{i\max})}=0.980150$, 均小于1。因此, 无论实际载荷小于 $2I_{i\max}$, 或者小于 $I_{i\max}$, 两回线路可靠性同调效果更好。只有当输电需求大于 $2I_{i\max}$ 时, 才有必要采用三回线路。

计算 $\eta_{(2I_{i\max})}$ 对各元件可靠性参数的灵敏度如下:

$$\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial U_i = 1.831917, \quad \partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial U_B = -1.985551$$

$$\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial p_R = -8.436896 \times 10^{-3}$$

$$\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial p_B = -8.452958 \times 10^{-3}$$

$$\partial\eta_{(2I_{i\max})}/\partial p_{st} = -8.608217 \times 10^{-3}$$

结果表明:

(1) 基于给定原始参数, 一次元件故障影响比二次元件影响更明显。一次设备中, 断路器故障对同调特性影响比线路影响更明显。保护参数影响较为接近, 其中相关跳闸率影响稍大一些。

(2) 非同调主要由于故障扩大引起。如果能降低其发生概率, 即改善相关可靠性参数, 即可降低非同调发生的可能, 减缓其后果。

检验上述非同调影响因素, 考虑线路短路、断路器短路、保护拒动、断路器动作失败、保护相关跳闸影响, 分别修改一次和二次设备不可用率, 计算三回和两回线路状态概率和同调指标, 结果见表2~表6。其中最后一列数据为同调指标, 括号内为根据灵敏度计算结果, 与实际结果相差很小。

表 2 线路故障率对非同调特性影响
Table 2 Impact of line fault on reliability incoherency

参数变化	III_{\max}	三回线路		两回线路		η
		分布概率	累积概率	分布概率	累积概率	
$U_i \times 2$	3.0	0.933 0	0.933 0	/	/	/
	2.0	0.008 1	0.941 1	0.954 8	0.954 8	0.985 596(0.985 596)
	1.0	0.000 3	0.941 4	0.005 6	0.960 4	0.980 190
	0	0.055 8	0.997 2	0.038 2	0.998 6	
$U_i/2$	3.0	0.939 4	0.939 4	0	0	/
	2.0	0.002 0	0.941 4	0.959 2	0.959 2	0.981 474(0.981 474)
	1.0	0.000 1	0.941 5	0.001 4	0.960 6	0.980 126
	0	0.056 1	0.997 6	0.038 2	0.998 8	

表 3 断路器故障率对非同调特性影响
Table 3 Impact of break fault on reliability incoherency

参数变化	III_{\max}	三回线路		两回线路		η
		分布概率	累积概率	分布概率	累积概率	
$U_B \times 2$	3.0	0.881 9	0.881 9	/	/	/
	2.0	0.003 8	0.885 7	0.919 6	0.919 6	0.963 093(0.962 922)
	1.0	0.000 2	0.885 8	0.002 7	0.922 3	0.960 449
	0	0.105 4	0.991 2	0.073 3	0.995 6	
$U_B/2$	3.0	0.966 0	0.966 0	0	0	/
	2.0	0.004 2	0.970 2	0.977 2	0.977 2	0.992 801(0.992 776)
	1.0	0.000 2	0.970 3	0.002 9	0.980 1	0.990 075
	0	0.028 9	0.999 2	0.019 5	0.999 6	

表 4 保护拒动率对非同调特性影响
Table 4 Impact of failure of relay protection on reliability incoherency

参数变化	III_{\max}	三回线路		两回线路		η
		分布概率	累积概率	分布概率	累积概率	
$p_R \times 10^3$	3.0	0.937 2	0.937 2	/	/	/
	2.0	0.003 3	0.940 5	0.957 7	0.957 7	0.982 047(0.982 005)
	1.0	0.000 1	0.940 7	0.002 3	0.960 0	0.979 862
	0	0.046 1	0.986 7	0.031 4	0.991 4	0

表 5 断路器动作失败率对非同调特性影响
Table 5 Impact of failure of breaker on reliability incoherency

参数变化	III_{\max}	三回线路		两回线路		η
		分布概率	累积概率	分布概率	累积概率	
$p_B \times 10^3$	3.0	0.937 2	0.937 2	/	/	/
	2.0	0.002 6	0.939 8	0.957 7	0.957 7	0.981 340(0.981 174)
	1.0	0.000 1	0.940 0	0.001 8	0.959 5	0.979 607
	0	0.037 1	0.977 0	0.025 3	0.984 8	0

表 6 相关跳闸率对非同调特性影响
Table 6 Impact of related trip on reliability incoherency

参数变化	III_{\max}	三回线路		两回线路		η
		分布概率	累积概率	分布概率	累积概率	
$p_{st} \times 2$	3.0	0.937 2	0.937 2	/	/	/
	2.0	0.003 9	0.941 1	0.957 7	0.957 7	0.982 677(0.982 676)
	1.0	0.000 3	0.941 5	0.002 8	0.960 5	0.980 213
	0	0.056 0	0.997 5	0.038 3	0.998 7	
$p_{st}/2$	3.0	0.937 2	0.937 2	0	0	/
	2.0	0.004 1	0.941 4	0.957 7	0.957 7	0.982 934(0.982 934)
	1.0	0.000 1	0.941 5	0.002 8	0.960 6	0.980 119
	0	0.056 0	0.997 5	0.038 2	0.998 7	

计算一次和二次元件可靠性参数之间的换算系数为： $c_{iR}=4.60055 \times 10^{-3}$ ， $c_{iB}=4.6143 \times 10^{-3}$ ， $c_{ist}=4.6990 \times 10^{-3}$ ， $c_{BR}=-4.2491 \times 10^{-3}$ ， $c_{BB}=-4.2572 \times 10^{-3}$ ， $c_{Bst}=-4.3354 \times 10^{-3}$ 。

为维持相同的同调水平，如果保护拒动率、断路器动作失败率、相关跳闸率增加一个单位，线路不可用率与断路器短路概率对应的增量可由上述换算系数确定。

4 结论

针对平行多回输电线路可靠性，本文提出期望载容量比、降额运行概率比、满足给定载概率比三个同调指标。建立了满足给定载概率比对一、二次设备的灵敏度模型，在同调水平相同的条件下，量化一、二次设备可靠性参数间换算关系，得到如下结论：

(1) 同型平行线路回数越多载能力越大，认为是同调，但其载能力利用效率未必同调，而且回数增多伴随着降额运行概率增大，认为是非同调。

(2) 一次元件故障对同调能力的影响比二次元件更明显。一次设备中，断路器故障对同调特性影响比线路影响更明显。保护参数中相关跳闸率影响稍大一些。改善系统相关可靠性参数可降低非同调发生的可能，优化可靠性指标。

(3) 若一次(二次)设备可靠性指标降低，可基于本文换算系数，通过提高二次(一次)设备可靠性参数以维持系统同调水平不变。

参考文献

[1] 李文沅, 周家启, 谢开贵, 等. 在输电线和变电站组合联结网络中的非同调现象[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 7-11.
LI Wenyuan, ZHOU Jiaqi, XIE Kaigui, et al. Non-coherence phenomenon in combinative transmission line and substation configurations[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 7-11.

[2] 谢开贵, 李万年. 配电网可靠性非同调分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 18-23.
XIE Kaigui, LI Wannian. Analysis of reliability non-coherence in distribution power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2011, 23(3): 18-23.

[3] LI W, ZHOU J, XIE K, et al. Non-coherence in transmission line arrangements[C] // 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006: 1-6.

[4] BILLINTON R, ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. New York: Plenum Press, 1984.

[5] 李生虎, 马燕如, 陈鹏, 等. UHVDC 系统可靠性分层

等值与灵敏度分解[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 9-17.

LI Shenghu, MA Yanru, CHEN Peng, et al. Hierarchical reliability equivalence and sensitivity decomposition to UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 9-17.

[6] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发输电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 260-270.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Risk assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 260-270.

[7] 秦志龙, 李文沅, 熊小伏. 含具有风速相关性风电场的发输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 27-33.
QIN Zhilong, LI Wenyuan, XIONG Xiaofu. Reliability assessment of composite generation and transmission systems with wind farms considering wind speed correlations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 27-33.

[8] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58-65.
HU Guowei, BIE Chaohong, WANG Xifan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.

[9] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
BIE Chaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.

[10] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 38(17): 76-81.

[11] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

- [12] 梅黄炜, 刘健, 魏昊焜, 等. 分布式光伏电源极端可接入容量极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 22-28.
MEI Huangwei, LIU Jian, WEI Haokun, et al. Extreme capacity limitations of photovoltaic generators in distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 22-28.
- [13] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的DEIWO算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.
LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [14] LI W. Reliability assessment of electrical power systems using Monte Carlo methods[M]. Springer Science & Business Media, 1994.
- [15] JONNAVITHULA S, BILLINTON R. Topological analysis in bulk power system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 456-463.
- [16] 纪静, 谢开贵, 曹侃, 等. 多回并列运行输电线路的可靠性非同调辨识[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1022-1028.
JI Jing, XIE Kaigui, CAO Kan, et al. Recognizing the reliability non-coherence components of multiple parallel transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1022-1028.
- [17] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 175-182.
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun, et al. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 175-182.
- [18] 李生虎, 王京景, 刘正楷. 基于瞬时状态概率的保护系统短期可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 50-55.
LI Shenghu, WANG Jingjing, LIU Zhengkai. Short term reliability evaluation for protection system based on instantaneous state probability[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 50-55.
- [19] MELO A C G, PEREIRA M V F. Sensitivity analysis of reliability indices with respect to equipment failure and repair rates[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 1014-1021.
- [20] SALEHFAR H, TRIHADI S. Application of perturbation analysis to sensitivity computations of generating units and system reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(1): 152-158.
- [21] 任震, 梁振升, 黄雯莹. 交直流混合输电系统可靠性指标的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 33-36.
REN Zhen, LIANG Zhensheng, HUANG Wenying. Sensitivity analysis of AC/DC hybrid transmission system reliability indices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 33-36.
- [22] LI S. Sensitivity models for steady-state and dynamic state probabilities and its application to protection system reliability evaluation[C] // Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Orlando, 2013: 1-6.
- [23] 李生虎, 朱莹, 朱婷涵. 继电保护系统长期和短期可靠性的参数灵敏度算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 120-126.
LI Shenghu, ZHU Ying, ZHU Tinghan. Parametric sensitivity of long and short term reliability for relay protection systems[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 120-126.

收稿日期: 2015-04-15; 修回日期: 2015-06-03

作者简介:

刘韶峰(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制、电力系统规划与可靠性;
E-mail: liushaofeng@sgepri.sgcc.com.cn

李碧君(1966-), 男, 博士, 研究员级高工, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

徐泰山(1968-), 男, 博士, 研究员级高工, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 葛艳娜)