

考虑相关故障的双回输电线路可靠性评估

任 震,梁振升,黄雯莹

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要: 电力负荷需求不断增加使得原有输电系统可能出现过负荷现象。特别是双回平行输电线路,当其中一回线路发生故障退出而另外一回线路仍然运行时,该回线路发生过负荷的概率就会增大,甚至引起相关故障。为了考虑线路过负荷情况下双回平行输电线路的可靠性,提出应用马尔可夫随机过程建立双回平行输电线路考虑相关故障时的可靠性等效模型及其状态空间图,根据该状态空间图计算出考虑相关故障的双回平行输电线路的可靠性指标。利用算例分析了考虑相关故障时双回平行输电线路在可能的相对频率下可靠性,并与传统的双回输电线路四状态可靠性模型的可靠性指标比较。结果验证了所提可靠性等效模型的实用性和有效性,并指出输电线路过负荷运行引起相关故障对输电系统可靠性有较大影响。

关键词: 电力系统; 可靠性评估; 双回输电线路; 相关故障

中图分类号: TM 726; TM 732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)06-0014-03

0 引言

输电线路是输电系统的主要部分之一。保护电力系统同步稳定性的最根本前提是在任何情况下,包括在故障后的电网结构下,保证线路的传输能力总是大于系统通过它传输的最大功率^[1]。若在失去线路后无条件地保持电源的完整,将会由于失去线路后的大负荷转移^[2],使得与它并联的其他线路严重过负荷和受端电压的严重下降而失去稳定。当线路容量不能满足负荷要求,即发生潮流越界时,输电系统就会发生过负荷现象。由于电力系统网架较弱,一旦并行线跳去一回时,潮流发生转移,很容易在重负荷输电线上发生低频振荡或功率振荡等问题。此外,在高峰负荷时输电线路通过的负荷电流增大,致使导线温度升高,弧垂增大。实践证明,当导线负荷电流接近其长期允许电流值时,导线温度可达 70℃ 左右。当导线过载时,弧垂增加率与电流增加率几乎成线性关系。由于弧垂增大,减少了导线对地和其他,交叉跨越设施的距离,直接影响线路的安全运行。由以上分析可知,当线路过负荷运行时,输电线路的故障率增大,甚至引起相关故障,导致电力输送中断。

基于此,本文讨论计及双回平行输电线路相关故障时的输电系统可靠性,即讨论计及双回平行输电线路,当其中一回故障导致另一回输电线路过负荷时输电系统可靠性。首先应用马尔可夫过程建立能够反映系统运行的相应的状态空间图,然后应用状态空间图求解系统的可靠性指标,并与传统的双

回平行输电线路四状态可靠性等效模型的可靠性指标比较。分析结果验证了本文提出的可靠性模型的有效性,以及相关故障对系统可靠性的显著影响。

1 双回平行输电线路可靠性模型

两并联元件,其中一元件失效,另一元件继续工作时,其失效率有所改变,这是由于元件由非全负荷状态到全负荷状态所致^[3]。输电线路的传输容量存在极限,当线路容量不能满足负荷要求时,会发生过负荷现象。双回平行输电线路正常工作时,线路容量有一定裕度。当一回线路发生故障,另一回线路仍在工作时,由于负荷转移,就可能发生过负荷现象。本文讨论的双回平行输电线路相关故障定义为:当一回输电线路发生故障并引起另外一回输电线路过负荷时,该回线路发生故障。

通常设计双回平行输电线路正常运行时,线路的输送容量具有一定的裕度。为简化分析,假设双回平行输电线路同时运行时不会过负荷。双回平行输电线路状态空间图如图 1 所示。

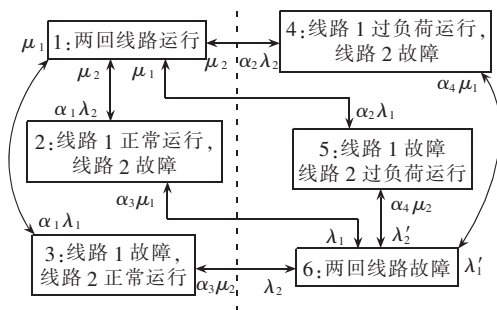


图 1 考虑相关故障时的双回平行输电线路状态空间图

Fig.1 The state-space diagram for two parallel transmission lines with respect to relevant fault

两回线路正常运行时的故障率分别为 λ_1, λ_2 , 过负荷运行时的故障率分别为 λ'_1, λ'_2 。线路的修复率分别为 μ_1, μ_2 。负荷采用两状态模型^[4], 并以线路的额定输送容量为分界。定义单回线路独立运行时正常运行的相对频率为 α_1 , 过负荷运行的相对频率为 α_2 , 且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; 定义两回线路故障一回线路修复并正常运行的相对频率为 α_3 , 过负荷运行的相对频率为 α_4 , 且 $\alpha_3 + \alpha_4 = 1$ 。

图 1 相应的转移率矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -k_{11} & \alpha_1 \lambda_2 & \alpha_1 \lambda_1 & \alpha_2 \lambda_2 & \alpha_2 \lambda_1 & 0 \\ \mu_2 & -k_{22} & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 \\ \mu_1 & 0 & -k_{33} & 0 & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & 0 & -k_{44} & 0 & \lambda'_1 \\ \mu_1 & 0 & 0 & 0 & -k_{55} & \lambda'_2 \\ 0 & \alpha_3 \mu_1 & \alpha_3 \mu_2 & \alpha_4 \mu_1 & \alpha_4 \mu_2 & -k_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$k_{11} = (\alpha_1 + \alpha_2)(\lambda_1 + \lambda_2), \quad k_{22} = \mu_2 + \lambda_1$$

$$k_{33} = \mu_1 + \lambda_2, \quad k_{44} = \mu_2 + \lambda'_1$$

$$k_{55} = \mu_1 + \lambda'_2, \quad k_{66} = (\alpha_3 + \alpha_4)(\mu_1 + \mu_2)$$

设图 1 中各状态的极限状态概率即稳态概率分别为 $p_1 \sim p_6$ 。由于在任何时刻系统各状态的概率之和都恒等于 1, 即 $\sum_{i=1}^6 p_i(t) = 1$, 因此 $\sum_{i=1}^6 p_i = 1$ 。联立求解下列线性方程组可求得系统在稳态运行下各状态的稳态概率。

$$\begin{aligned} (p_1, p_2, \dots, p_6)A &= 0 \\ p_1 + p_2 + \dots + p_6 &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

若以供电连续性为可靠性准则, 那么双回平行输电线路当两回线路均故障时系统失效。由图 1 可知, 系统的故障状态为状态 6, 则由式(2)可得系统的故障概率 p_F 的表达式为

$$p_F = \frac{1}{\frac{k_B - k_{66}}{k_A} (1 + \sum_{i=2}^5 k_{1i}) + 1 + \sum_{i=2}^5 k_{6i}} \quad (3)$$

$$k_{12} = \alpha_1 \lambda_2 / k_{22}, \quad k_{13} = \alpha_1 \lambda_1 / k_{33}$$

$$k_{14} = \alpha_2 \lambda_2 / k_{44}, \quad k_{15} = \alpha_2 \lambda_1 / k_{55}$$

$$k_{62} = \alpha_3 \mu_1 / k_{22}, \quad k_{63} = \alpha_3 \mu_2 / k_{33}$$

$$k_{64} = \alpha_4 \mu_1 / k_{44}, \quad k_{65} = \alpha_4 \mu_2 / k_{55}$$

$$k_A = k_{12} \lambda_1 + k_{13} \lambda_2 + k_{14} \lambda'_1 + k_{15} \lambda'_2$$

$$k_B = k_{62} \lambda_1 + k_{63} \lambda_2 + k_{64} \lambda'_1 + k_{65} \lambda'_2$$

为求图 1 可靠性模型的平均首次故障时间 t_{MTTF} , 取状态 6 为吸收状态, 则由非吸收状态组成的分块矩阵 Q 为

$$Q = \begin{bmatrix} -k_{11} & \alpha_1 \lambda_2 & \alpha_1 \lambda_1 & \alpha_2 \lambda_2 & \alpha_2 \lambda_1 \\ \mu_2 & -k_{22} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 0 & -k_{33} & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & 0 & -k_{44} & 0 \\ \mu_1 & 0 & 0 & 0 & -k_{55} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 I 为单位矩阵, 则基本矩阵 N 为

$$N = [I - Q]^{-1} = B^{-1} \quad (5)$$

若系统从状态 1 开始, 则双回平行输电线路的

平均首次故障时间 t_{MTTF} 为

$$t_{MTTF} = (B_{11} + B_{21} + B_{31} + B_{41} + B_{51}) / |B| \quad (6)$$

$$B_{11} = k_{22} k_{33} k_{44} k_{55}, \quad B_{21} = \alpha_1 \lambda_2 k_{33} k_{44} k_{55}$$

$$B_{31} = \alpha_1 \lambda_1 k_{22} k_{44} k_{55}, \quad B_{41} = -\alpha_2 \lambda_2 k_{22} k_{33} k_{55}$$

$$B_{51} = \alpha_2 \lambda_1 k_{22} k_{33} k_{44}$$

$$|B| = k_{11} B_{11} - \mu_2 B_{21} - \mu_1 B_{31} + \mu_2 B_{41} - \mu_1 B_{51}$$

不考虑相关故障时的传统双回平行输电线路可靠性模型^[5]如图 2 所示。

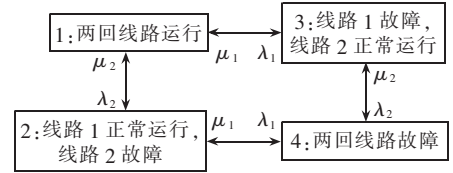


图 2 双回平行输电线路状态空间图

Fig.2 The state-space diagram for two parallel transmission lines

图 2 对应的转移概率矩阵为

$$A' = \begin{bmatrix} -k'_{11} & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 \\ \mu_2 & -k'_{22} & 0 & \lambda_1 \\ \mu_1 & 0 & -k'_{33} & \lambda_2 \\ 0 & \mu_1 & \mu_2 & -k'_{44} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$k'_{11} = \lambda_1 + \lambda_2, \quad k'_{22} = \mu_2 + \lambda_1$$

$$k'_{33} = \mu_1 + \lambda_2, \quad k'_{44} = \mu_1 + \mu_2$$

同理, 可求得系统故障率 p'_F 的表达式为

$$p'_F = \frac{1}{\frac{k'_{44} - k'_D}{k'_C} (1 + k'_{12} + k'_{13}) + 1 + k'_{42} + k'_{43}} \quad (8)$$

$$k'_{12} = \lambda_2 / (\mu_2 + \lambda_1), \quad k'_{13} = \lambda_1 / (\mu_1 + \lambda_2)$$

$$k'_{42} = \mu_1 / (\mu_2 + \lambda_1), \quad k'_{43} = \mu_1 / (\mu_1 + \lambda_2)$$

$$k'_C = k'_{12} \lambda_1 + k'_{13} \lambda_2, \quad k'_D = k'_{42} \lambda_1 + k'_{43} \lambda_2$$

平均首次故障时间表达式为

$$t'_{MTTF} = (B'_{11} + B'_{21} + B'_{31}) / |B'| \quad (9)$$

$$B'_{11} = k'_{22} k'_{33}, \quad B'_{21} = \lambda_1 k'_{33},$$

$$B'_{31} = \lambda_1 k'_{22}, \quad |B'| = k'_{11} B'_{11} - \mu_1 B'_{21} - \mu_2 B'_{31}$$

根据式(3)(6)(8)(9), 以传统双回路平行输电线路模型的可靠性指标为参考值, 可得各可靠性指标的单位增长率, 定义如下:

$$\Delta p = \frac{p_F - p'_F}{N \cdot p'_F} \quad (10)$$

$$\Delta t_{MTTF} = \frac{t_{MTTF} - t'_{MTTF}}{N \cdot t'_{MTTF}} \quad (11)$$

式中 N 为相对频率的增长倍数, $N = 10 \alpha_2 (\alpha_2 \neq 0)$ 。

2 算例

设双回平行输电线路正常情况下和过负荷情况下故障模式和维修模式时的随机数据统计平均值分别为 $\lambda = 0.01$ 次/a, $\lambda' = 0.015$ 次/a, $\mu = 0.49$ 次/a。分别取线路 1 和线路 2 单独运行时过负荷的相对频率为 0.0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 0.8, 0.9, 1.0 等情况, 且 $\alpha_1 = \alpha_3$, $\alpha_2 = \alpha_4$ 。根据式(8)和(9)可求得不考虑相

关故障时的双回平行输电线路可靠性指标为 $p'_F = 0.000\ 400\ 00, t'_{MTTF} = 2\ 600.000\ 0(a)$ 。根据式(3)(6)(10)和(11)求得考虑相关故障双回平行输电线路的可靠性指标及其单位增长率如表 1 所示。

表 1 双回平行输电线路的可靠性指标
Tab.1 The reliability indices of two parallel transmission lines

序号	α_1	α_2	p_F	t_{MTTF}/a	$\Delta p/\%$	$\Delta t_{MTTF}/\%$
1	1.00	0.00	0.000 400 00	2 600.000 0	0.000 0	0.000 0
2	0.90	0.10	0.000 846 91	1 250.100 0	1.117 3	-0.519 2
3	0.80	0.20	0.001 300 00	820.675 9	1.142 3	-0.342 2
4	0.75	0.25	0.001 600 00	699.787 7	1.155 2	-0.292 3
5	0.50	0.50	0.002 800 00	400.982 8	1.224 6	-0.169 2
6	0.25	0.75	0.004 300 00	279.343 1	1.302 8	-0.119 0
7	0.20	0.80	0.004 600 00	263.185 4	1.319 6	-0.112 3
8	0.10	0.90	0.005 300 00	235.749 9	1.354 7	-0.101 0
9	0.00	1.00	0.006 000 00	213.333 3	1.391 6	-0.091 8

对比由式(8)和(9)的计算结果和表 1 的计算结果可以发现,当 $\alpha_1 = 1.0, \alpha_2 = 0.0$ 时,即单回线路单独运行不存在过负荷时,本文提出的可靠性模型(如图 1 所示)的计算指标与传统可靠性模型(如图 2 所示)的计算指标一致。因此本文提出的双回平行输电线路可靠性模型具有一般通用性和有效性,能替代传统双回线路可靠性模型分析电力系统的可靠性。

由表 1 的计算结果可知,随着单回线路独立运行过负荷的相对频率增大,系统的失效概率增大,而平均首次故障时间减少。

从结果的比较可知,当单回线路过负荷运行的相对频率增大时,系统故障率的单位增长率有所增加,但是增长幅度较缓慢;而系统平均首次故障时间的单位增长率的绝对值减少较快。当相对频率增加到一定程度时,平均首次故障时间的减少幅度较小。系统的过负荷状态对系统可靠性指标影响较大,可近似认为相对频率的线性比例增长使系统故障率呈同比例增长,尽管平均首次故障时间并不是同比例减少,但它减少速度也是较快的。从情况 1 和情况 9 可知,单回线路仍正常运行和单回线路必然发生过负荷两者的可靠性指标差距 1 个数量级,若实际输电系统线路的故障率较大时,考虑相关故障的系统可靠性指标将会令人更加担忧。

若线路工作在重潮流下,线路的故障概率增大。若线路发生故障,则可能发生大规模潮流转移,影响整个电力系统的稳定性和可靠性。过去很多电网的大停电事故,都是由于一回线路发生故障,导致潮流转移,其他线路运行在过负荷情况下,故障率增大,整个系统的可靠性降低,导致局部电力输送中断,甚至大面积停电。因此在实际运行中,应该尽量避免线路运行在过负荷情况下,以提高输电线路可靠性。

3 结论

a. 双回平行输电线路的可靠性评估,不管线路

是处于正常工作情况还是过负荷工作情况,现有的方法通常都是假设两回线路的故障率是不变的。实际运行中,线路处在过负荷情况时会导致线路的故障率增大,可靠性降低。因此,本文考虑了双回平行输电线路工作在过负荷情况下的故障率,即考虑本文提出的线路相关故障。

b. 在考虑线路相关故障时,本文提出了相应的线路过负荷运行状态。应用马尔可夫随机过程,根据双回平行输电线路的可靠性模型及其状态空间图,求解线路的故障概率以及平均首次故障时间。从计算结果可知,单回线路过负荷运行的相对频率对系统的可靠性指标有着较大影响。双回平行输电线路相关故障使系统故障率显著增大,使平均首次故障时间显著减少。

c. 本文假设双回平行输电线路当两回线路均正常工作时不会出现过负荷现象。实际运行中,双回平行输电线路均过负荷运行的情况也可能出现,若将该项也考虑进去,则双回平行输电线路的故障率会更大,而平均首次故障时间会更短,这是值得注意的。

参考文献:

[1] KUNDER P. Power system stability and control(photocopy edition). 北京:中国电力出版社,2001.
[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 Hong-tao,LIU Yu-tian,et al. On opening 500kV-220kV electromagnetic loop circuit [J].**Electric Power Automation Equipment**,2003,23 (12):13-16.
[3] SHABAN A,KHANNA S. Reliability analysis of transmission system with overload [A]. **System Theory,Proceedings of the 27th Southeastern Symposium**[C]. Starkville,USA:[s.n.],1995. 68-72.
[4] 郭永基. 电力系统可靠性分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2003.
[5] ENDRENYI J. Reliability modeling in electric power systems[M]. New York,USA:John Wiley & Sons,1978.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

任 震(1938-),男,江苏宜兴人,教授,博士研究生导师,从事电力系统规划与可靠性、小波分析及其在电力系统中的应用、高压直流输电、电源滤波、电力市场等领域的科研和教学工作;

梁振升(1980-),男,广东佛山人,硕士研究生,研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail:taurusleung@hotmail.com);

黄雯莹(1939-),女,浙江鄞县人,教授,主要研究方向为可靠性数学、小波分析等。

Reliability evaluation of two parallel transmission lines with respect to relevant fault

REN Zhen, LIANG Zhen-sheng, HUANG Wen-ying

(Electric Power College of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The increase of power supply demand makes the transmission system overload possible, especially that of two parallel transmission lines. When one line is in outage, the other may happen overload with greater possibility, which may cause relevant fault. A reliability equivalent model of two parallel transmission lines with respect to relevant fault and its state-space diagram are presented for it by using the theory of Markov process. The reliability indices can be calculated according to the state-space diagram. Case study calculates the reliability under possible relative frequency of overload and compares it with the results by the conventional 4-state two-transmission-line reliability model, which shows that the reliability equivalent model is practical and effective, and that the relevant fault caused by transmission line overload has greater impact on transmission system reliability.

This project is supported by National Natural Science Fund of China(50337010).

Key words: power systems; reliability evaluation; transmission line; relevant fault