

基于风险的低压切负荷量的确定方法

唐 朝¹, 卢继平¹, 汪 洋¹, 薛 毅²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆市 400044; 2. 贵阳供电局, 贵州省贵阳市 550002)

摘要: 针对低压减载方案中切负荷量的问题,利用马尔可夫方法,计算出低压减载方案各种动作情况的概率。在此基础上,结合电压崩溃的风险理论,以在预想事故下所切负荷量为变量,构造方案引入所带来的电压崩溃风险的函数,再以该风险量最小为标准,确定切除负荷量的多少。与传统方法不同,该方法综合分析了各种意外事件、考虑了低压减载方案本身的可靠性。计算处理的信息更丰富,结果更准确。IEEE 14 节点的算例表明了该方法计算的有效性。该方案为低压减载方案的设计提供了参考。

关键词: 低压减载; 切负荷量; 可靠性; 风险

中图分类号: TM712

0 引言

20 世纪 70 年代以来,国际上发生了多次电压崩溃引起的大面积停电事故,较典型的有:1987 年 1 月 12 日法国电网,1987 年 7 月 23 日日本东京电网,1996 年 7 月 2 日美国西部联合电网^[1]等。在国内“西电东送,南北互供,全国联网”发展目标逐步实现的情况下,各区域电网将逐渐互联成一个全国性的大电网,一个区域电网发生重大扰动或事故,必将通过相关断面的联络线影响相邻的区域电网,导致电网发生功率不平衡^[2]。这将会带来电压的不稳定现象。低压减载是防止系统发生电压崩溃的一种经济、有效的措施^[3]。

需要确定减载量的多少是低压减载方案设计中的一个重要问题。切负荷量过多会带来附加损失,切负荷量过少则不能很好解决电压不稳定的问题。因此针对这个问题提出了一些解决办法,例如:文献[4]指出利用对潮流方程最小不匹配函数来确定低压减载方案中切负荷量的大小。也有利用最优化的方法,通过构造最优策略的数学模型,分别对穷举法、过切法、动态规划法确定低频低压切负荷量的计算时间和计算结果进行了分析和研究^[5]。然而,这些研究方法大多没有考虑到事故的不确定性等因素,其结果存在一定的局限性。文献[6]提出一种基于低压减载方案的新的可靠性指标,为解决低压减载的负荷量确定问题提供了一个新的思路,但它在

计算过程中没有计及装置本身的错误(如误动、拒动等)所带来的风险,计算结果同样存在局限性。

本文根据低压减载方案的逻辑关系,构造马尔可夫模型,分析其各种动作情况(包括正常动作、误动、拒动)的概率,结合电压崩溃风险理论,研究其接入系统后所带来的影响,并利用风险值最小的原则,确定切负荷量的多少。

1 电压崩溃的风险

1.1 电压崩溃的概率

考虑系统的不确定性因素,对电压崩溃的影响主要包括:系统事故、负荷及运行参数的变化等。

1.1.1 事故发生的概率

系统某条线路突然退出运行,其发生的概率近似满足指数分布,可表示为^[7]:

$$P(E_i) = (1 - e^{-\lambda_i}) \prod_{j \neq i} e^{-\lambda_j} \tag{1}$$

式中: E_i 表示第 i 个事故; λ_i 和 λ_j 分别为第 i 和第 j 个设备的故障率。

1.1.2 系统负荷的概率分布

假设负荷近似服从正态分布^[8],即

$$L \sim N(\mu_L, \sigma_L^2) \tag{2}$$

式中: L 为系统的负荷; μ_L 为负荷分布均值; σ_L 为负荷分布的标准差。

1.1.3 运行参数偏差

一般情况下可假设系统运行参数满足多元正态分布^[9]。由此可定义参数向量 $\mathbf{K}_p$ 的期望值和方差分别为 $E(\mathbf{K}_p)$ 和 $\mathbf{V}_p$ 。再根据 P - V 曲线^[10],得到系统的最大负荷极限期望值 $E(L_{cr})$ 及其运行参数的灵敏度矩阵 $\mathbf{A}_p$ 。最大负荷极限可表示为^[11]:

收稿日期: 2008-05-11; 修回日期: 2008-09-15。
国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目
(2004CB217908)。

$$L_{cr} = E(L_{cr}) + A_P^T(K_P - E(K_P))A_P \quad (3)$$

1.1.4 电压崩溃的概率

定义第 i 种事故下系统的负荷裕度:

$$M_i = L_{cri} - L \quad (4)$$

式中: L_{cri} 为第 i 种事故下系统的负荷极限。

由式(2)~式(4), M_i 服从的概率分布为:

$$M_i \sim N(E(L_{cri}) - \mu_L, A_P^T V_P A_P + \sigma_L^2) \quad (5)$$

于是可以得到系统发生第 i 种事故下, 电压崩溃的概率为^[12]:

$$P(C_i | E_i) = P(M_i < 0 | E_i) \quad (6)$$

式中: C_i 表示在第 i 种事故下发生了电压崩溃。

1.2 电压崩溃的风险

为方便起见, 假设电压崩溃发生后, 将会导致系统的全部负荷损失。则它的影响可表示为^[12]:

$$I_m(C) = F + RF_r \quad (7)$$

式中: F 为电压崩溃所带来的维修启动费用, 一般为常数; R 为损失的负荷量; F_r 为单位负荷损失费用。

由式(6)和式(7), 可得到发生第 i 种事故电压崩溃的风险为:

$$R_{isk}(C | E_i) = P(C | E_i) I_m(C) \quad (8)$$

2 低压减载方案的风险及切负荷量分析

2.1 低压减载方案的可靠性分析

首先了解低压减载方案的工作原理, 以 IEEE 14 节点^[13]系统(见附录 A)为例进行说明。连续潮流计算得到节点 7 的 P - V 曲线如图 1 所示。

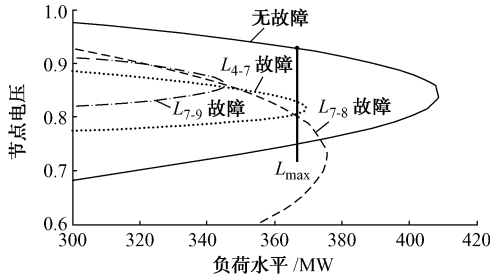


图 1 节点 7 的 P - V 曲线
Fig. 1 P - V curves for node 7

设 L_{cr0} , L_{cr1} , L_{cr2} 和 L_{cr3} 分别表示无故障、线路 L_{4-7} 断线故障、线路 L_{7-8} 断线故障和线路 L_{7-9} 断线故障时系统的最大负荷极限, L_{max} 为系统正常情况下允许的最大运行点处所对应的负荷水平。从图 1 看出, 当发生 L_{7-8} 断线时, 系统运行达到的最大负荷都不超过静态稳定指标下的临界极限点, 即在现有电网规划和发展水平上, 发生此类故障, 其负荷增长达到的最大值不超过临界极限负荷值。为保证供电的可靠性, 不需要切除负荷; 反之, 就需要切除部分负荷以保证系统的稳定性。为了降低低压减载方案的

误动率, 设计时首先比较 L_{cri} 和 L_{max} 的大小, 再根据低电压的门槛值和延迟时间决定减负荷。由此, 可得到低压减载方案的逻辑功能框图见图 2。

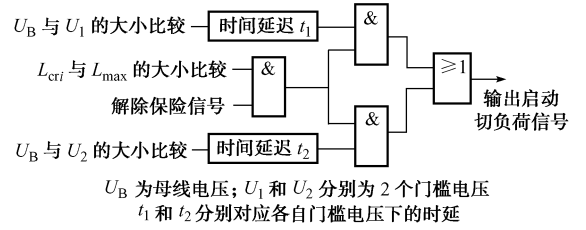


图 2 低压减载方案逻辑框图
Fig. 2 Logic block diagram of under voltage load shedding scheme

在研究低压减载方案可靠性时, 假定各个逻辑门信号输入的可靠性均为 100%, 定义预想事故 E_i 发生的条件下的输入信号概率为:

$$P(I_i) = \begin{cases} 1 & L_{cri} < L_{max} \\ 0 & L_{cri} > L_{max} \end{cases} \quad (9)$$

输出信号为启动切负荷的信号。这里只计入逻辑电路的可靠性, 并认为各逻辑门发生故障的概率相互独立, 且具有无记忆性。可以利用马尔可夫方法^[13]来建立其状态转移的模型, 进而求出停留在各个状态下的概率。经过状态组合, 可以得到如下 4 种情况下的概率: ①输入信号为 1, 输出信号为 1, 为事件 X_1 , 其概率为: $P(E_{LS} | E_i, I_i)$; E_{LS} 表示方案拒动这一事件, I_i 表示第 i 种事故下方案输入信号为 1 这一事件。②输入信号为 1, 输出信号为 0, 为事件 X_2 , 即表示拒动, 其概率为: $P(\bar{E}_{LS} | E_i, I_i)$; $\bar{E}_{LS}$ 表示方案拒动这一事件。③输入信号为 0, 输出信号为 1, 为事件 X_3 , 即表示误动, 其概率为: $P(E_{LS} | E_i, \bar{I}_i)$; $\bar{I}_i$ 表示第 i 种事故下方案输入信号为 0 这一事件。④输入信号为 0, 输出信号为 0, 为事件 X_4 , 即发生正确不动作, 其概率为 $P(\bar{E}_{LS} | E_i, \bar{I}_i)$ 。

应用全概率公式, 由上文分析可得到低压减载方案在各种条件下的概率。

正确动作的概率为:

$$P(E_{CLS}) = \sum_i P(E_{LS} | E_i, I_i) P(E_i) P(I_i) \quad (10)$$

式中: E_{CLS} 表示方案正确动作这一事件。

发生拒动的概率为:

$$P(\bar{E}_{LS}) = \sum_i P(\bar{E}_{LS} | E_i, I_i) P(E_i) P(I_i) \quad (11)$$

发生误动的概率为:

$$P(E_{ELS}) = \sum_i P(E_{LS} | E_i, \bar{I}_i) P(E_i) P(\bar{I}_i) \quad (12)$$

式中: E_{ELS} 表示方案误动这一事件。

由于方案的正确不动作情况, 不会对原有系统

带来附加影响,就不再考虑。

2.2 低压减载方案的风险分析

低压减载方案所带来的风险可表示为其发生各种动作情况的概率与它所引起的影响的乘积。

2.2.1 正确动作的风险

当低压减载方案正确动作后,其所带来的影响包含 2 个部分:

1)方案对电压崩溃风险的降低。结合式(8)可以得到:

$$\Delta R_{isk}(C | E_{CLS}) = R_{isk}(C | E_{CLS}) - \sum_i R_{isk}(C | E_i, I_i) \tag{13}$$

其中正确动作情况下带来的电压崩溃风险为:

$$R_{isk}(C | E_{CLS}) = \sum_i P(M_i' < 0 | E_i, I_i) I_m(C) \tag{14}$$

式中: M_i' 为切负荷后系统的负荷裕度,可表示为:

$$M_i' \sim N(E(L_{cri}) - \mu_L + \Delta L_S, \mathbf{A_P^T V_P A_P} + \sigma_L^2) \tag{15}$$

式中: ΔL_S 为正确动作情况下切除的负荷量。

2)切负荷所带来的损失。

结合这 2 部分可以得到方案正确动作情况下所带来的影响:

$$I_m(E_{CLS}) = \Delta R_{isk}(C | E_{CLS}) + \Delta L_S F_r \tag{16}$$

因为低压减载方案应带来有利的影响,因此该影响值一般为负。可得到风险的表达式为:

$$R_{isk}(E_{CLS}) = P(E_{CLS}) I_m(E_{CLS}) \tag{17}$$

2.2.2 拒动的风险

当低压减载方案发生拒动时,与不接入低压减载方案所发生的电压崩溃风险相同。在不计及方案本身的启动和维护等费用时,此时不带来附加影响,计入的风险值为 0。

2.2.3 误动的风险

与正确动作的情况类似,只是由于误动会带来不利影响,一般情况下负荷损失的风险比系统电压崩溃风险的减少量要大,因此其影响值一般为正。定义其所带来的风险为:

$$R_{isk}(E_{ELS}) = P(E_{ELS}) I_m(E_{ELS}) \tag{18}$$

式中: $I_m(E_{ELS})$ 表示误动的影响,与式(16)正确动作的影响分析类似,不再详述。

2.2.4 整体风险及切负荷量的确定

可以得到低压减载方案的整体风险为:

$$R_{isk}(E_{LS}) = R_{isk}(E_{CLS}) + R_{isk}(E_{ELS}) \tag{19}$$

由以上分析可知,该风险可分为 2 个部分:一部分是方案所带来的电压崩溃风险值的减小,这部分是关于 ΔL_S 的减函数;另一部分是切负荷量带来的

损失,这部分是关于 ΔL_S 的增函数,它们之和必然存在一个 ΔL_S ,使得方案所带来的整体风险最小,可作为确定低压切负荷量的一个标准。

2.3 方法的有效性分析

在任一瞬间,从某一节点看入系统,都可以把外部系统等价为一个电源 $\dot{E}$,经过一个传输阻抗 Z_{tr} ,向该节点供电。此时该节点测得的电压和电流相量之比为负荷阻抗 Z_{fh} ,在保持功率因数不变的条件下,当 $|Z_{fh}| > |Z_{tr}|$ 时,系统电压稳定。反之,电压失稳^[14]。如图 1 所示的 $P-V$ 曲线,当发生 L_{7-9} 断线故障时,从节点 7 看入系统,等效的传输阻抗 Z_{tr} 增大,随着负荷在当前水平下的变化,可能带来电压失稳。需要切除部分负荷,使负荷阻抗 Z_{fh} 增大,可减小发生电压崩溃的概率。因此,利用该方法可有效改善系统的电压失稳问题。此外,该方法是在装置接入系统后所带来的附加风险最小的条件下所做出的决策,从维持电压稳定层面分析,其求出的切负荷量,可使在发生不确定性故障条件下,低压减载方案对系统造成的整体经济影响减小。综上所述,该方法在维持电压稳定及减小经济影响方面均有效。

3 算例分析

3.1 计算低压减载方案的可靠性

为了验证所提出的方法,以图 2 所示的方案为例,根据 2.1 节所提供的方法计算其可靠性。逻辑部件失效的概率分布函数为^[15]:

$$F_i(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f_i(T) dT = 1 - e^{-\lambda_i t} \tag{20}$$

式中: λ_i 为逻辑部件 i 的失效概率; t 为发生一次状态转移的时间间隔; T 为积分过程中的一个变量。

当 $\lambda_i t$ 足够小时,

$$F_i(t) \approx \lambda_i t \tag{21}$$

定义门电路正常工作、输出恒为 1、输出恒为 0 的故障模式分别为 0,1,2。各逻辑门部件的故障率如表 1 所示^[6]。

表 1 逻辑门电路的故障率
Table 1 Failure rate of logical gate circuit

逻辑门	故障形式	故障率/(次·d ⁻¹)
与门	输出恒为 0	0.02/365(λ_1)
与门	输出恒为 1	0.000 3/365(λ_2)
或门	输出恒为 0	0.02/365(λ_3)
或门	输出恒为 1	0.000 3/365(λ_4)

利用连续马尔可夫过程分析的方法^[16],定义状态 $S_0 \sim S_{80}$ 分别代表故障模式的组合为:0000 ~ 2222,根据表 1 数据,实施状态转移,可得到状态转

移矩阵 $\mathbf{B}$ (详细过程见附录 B)。定义初始触发状态的概率为:

$$\mathbf{P}^0 = (\mathbf{P}(S_0'(t_0)), \dots, \mathbf{P}(S_n'(t_0))) = (1, 0, \dots, 0) \quad (22)$$

式中: $S_0'(t_0) \sim S_n'(t_0)$ 表示初始时刻 $0 \sim n$ 个状态。

经历 m 个时间周期, 停留在各状态的概率为:

$$\mathbf{P}^m = (\mathbf{P}(S_0'(t_m)), \dots, \mathbf{P}(S_n'(t_m))) = \mathbf{P}^0 \mathbf{B}^m \quad (23)$$

式中: $S_0'(t_m) \sim S_n'(t_m)$ 表示第 m 个时刻 $0 \sim n$ 个状态。

根据上述分析, 按照 $m=365$ 计算得到发生预想事件的条件下, 正确动作 (所包含的状态见附录 B) 的概率为:

$$P(E_{\text{CLS}} | E_i, I_i) = P(X_1) = \sum_i S_i'(t_m) = 0.96044 \quad (24)$$

式中: $S_i'(t_m) \in X_1$, $S_i'(t_m)$ 表示第 m 个时刻 i 个状态, X_1 为正确动作事件的集合。

在发生预想事件的条件下, 误动的概率为:

$$P(E_{\text{ELS}} | E_i, \bar{I}_i) = P(X_3) = \sum_j S_j'(t_m) = 0.00117 \quad (25)$$

式中: $S_j'(t_m) \in X_3$, $S_j'(t_m)$ 表示第 m 个时刻 j 个状态, X_3 为误动事件的集合。

3.2 计算低压减载方案的风险及切负荷量

在分析其风险时, 首先进行如下假设^[11]: ①在研究时间内, 系统将保持与当前状态相同的运行条件; ②负荷分布的标准差为系统负荷的 2%; ③系统运行参数的变化为系统负荷分布系数的变化, 标准差为运行参数的 5%。

假设当前的负荷概率分布为 $N(260, 5.2^2)$, 根据连续潮流计算的方法, 得到各种事故下的最大负荷极限的均值和标准差, 再根据式(5)、式(6)计算出在不切负荷时电压崩溃的概率如表 2 所示。

表 2 电压崩溃的概率
Table 2 Probability of voltage collapse

系统事故	负荷裕度均值/ MW	负荷裕度标准 差/MW	电压崩溃 概率
无故障	149	35.19	1.15×10^{-5}
L_{4-7} 断线	109	29.23	9.61×10^{-5}
L_{7-8} 断线	116	29.39	3.96×10^{-5}
L_{7-9} 断线	85	28.43	1.40×10^{-3}

假设电压崩溃将造成全部用户供电中断 10 h, 用户损失为 5 000 元/(MW · h), 系统的维修启动费用为 100 万元, 电压崩溃引起全部负荷中断。根据式(10)~式(19)计算得到系统风险值和所切负荷量对应的函数关系。为了进行对比分析, 不计方案

本身动作可靠性的风险曲线如图 3 所示。

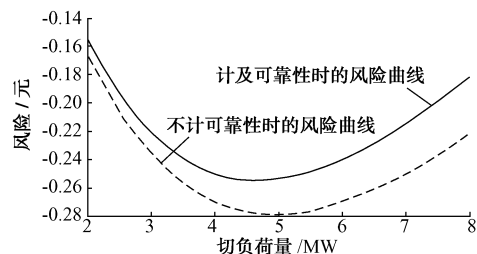


图 3 系统风险值与所切负荷量的函数关系
Fig. 3 Risk of system as a function of shedding amount

从图 3 可看出风险值存在一个最低点。结合前面的风险指标, 该算例在计及方案可靠性时, 切负荷量为 4.88 MW 时对系统的风险达到最小。不计方案本身可靠性时, 在 5.06 MW 时对系统的风险达到最低。具体切负荷的方式可采用联切负荷方案^[17]。为了能够看出按照该方法切负荷后的效果, 对图 1 所示系统在发生断线故障时, 数字仿真后得到切负荷后的电压随时间的响应如图 4 所示 (考虑系统在 5 s 发生故障, 20 s 时启动切负荷方案)。

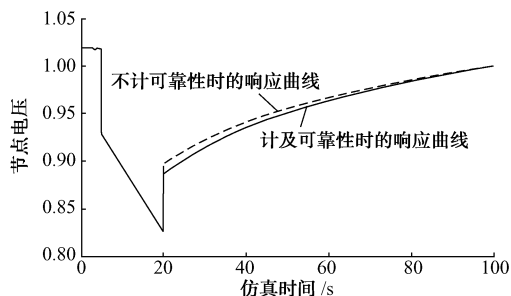


图 4 电压响应
Fig. 4 Voltage response

可以看出, 两者在维持电压稳定效果上基本相同。但对本例, 本文方法计算结果更小、更经济。

4 结语

通过分析, 总结出该方法具有如下特点: ①考虑了方案本身的可靠性, 计算结果更为准确, 更能满足实际情况; ②可采用联动切负荷的方案, 适应广域控制系统的要求。

在计算方案可靠性时, 未考虑切负荷的动态因素, 可以在日后进行低压减载时间的分析上加以考虑, 并可结合系统的功角稳定性^[18]。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 王梅义, 吴竟昌, 蒙定中. 大电网系统技术. 北京: 中国电力出版

社,1995.

[2] 丛伟. 广域保护系统结构及故障判别算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.

[3] 刘斌, 陈磊, 闵勇. 考虑暂态电压稳定的低压减载地点选择. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 11-14.
LIU Bin, CHEN Lei, MIN Yong. Determination of location of under-voltage load shedding considering transient voltage stability. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 11-14.

[4] 马平, 蔡兴国, 于继来, 等. 基于最小不匹配函数的低压减载算法研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 27-31.
MA Ping, CAI Xingguo, YU Jilai, et al. A study on a under voltage load shedding strategy based minimum mismatch function. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 27-31.

[5] 顿敦, 许先华, 吴兆国. 电力稳定控制系统低频低压减载的最优策略实现. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 28-31.
DUN Dun, XU Xianhua, WU Zhaoguo. Realization of optimal strategy for power system low-frequency and low-voltage load reduction. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 28-31.

[6] DAI Jianfeng, ZHOU Shuangxi, LU Zongxiang. A new risk indices based under voltage load shedding scheme// Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, August 14-17, 2005, Dalian, China: 5p.

[7] FU Weihui, ZHAO Sanyi, MCCALLEY J D. Risk assessment for special protection system. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1): 63-72.

[8] WAN Hua, MCCALLEY J D, VITTAL V. Risk based voltage security assessment. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1247-1254.

[9] MCCALLY J D, FOUAD A A, VITTAL V, et al. A risk-based security assessment in power system. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1210-1219.

[10] 周双喜, 朱凌志, 郭锡钊, 等. 电力系统电压稳定性及其控制. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[11] GREEN S, DOBSON I, ALVARADO F L. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 262-272.

[12] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 电力系统电压崩溃的风险评估. 电网技术, 2005, 29(19): 6-11.
CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Risk assessment of voltage collapse in power system. Power System Technology, 2005, 29(19): 6-11.

[13] FEDERICO M. An open source power system analysis toolbox. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1199-1206.

[14] 余文杰, 方勇杰. 一种基于 SMARTDevice 的低压切负荷算法. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 57-60.
YU Wenjie, FANG Yongjie. An undervoltage load shedding method based on SMARTDevice. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 57-60.

[15] 别列登 R, 阿伦 R N. 工程系统可靠性评估——原理和方法. 周家启, 黄雯莹, 吴继伟, 等译. 重庆: 科学技术出版社重庆分社, 1988.

[16] 国家电力监管委员会电力可靠性管理中心. 电力可靠性技术与管理培训教材. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[17] 李响, 张国庆, 郭志忠. 基于输电断面 N-1 静态安全潮流约束的联切负荷方案. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 42-44, 82.
LI Xiang, ZHANG Guoqing, GUO Zhizhong. Scheme for load-shedding based on the transmission interface N-1 static state safty power flow restriction. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 42-44, 82.

[18] 袁宇春, 张保会. 切负荷时刻对系统稳定性的影响. 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. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(11): 10-12.

唐 朝(1984—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统稳定与控制. E-mail: 84924888@163.com

卢继平(1960—),男,博士,教授,主要研究方向:继电保护和概率在电力系统中的应用。

汪 洋(1977—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统电压稳定性及控制。

Risk Based Determination of Under Voltage Load Shedding Amount

TANG Chao¹, LU Jiping¹, WANG Yang¹, XUE Yi²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Guiyang Power Supply Bureau, Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to determine the amount of under voltage load shedding (UVLS), Markov method is used to calculate the probabilities of various operations of UVLS schemes. Based on this approach, and considering voltage collapse risks, the voltage collapse risk index can be constructed. This risk index uses the amount of load shedding as variable under expected contingency cases. Using the minimum of this risk as criteria, the amount of load shedding can be determined. Different with traditional methods, this one is obtained based on a full-scale contingencies analysis and consideration of under voltage load shedding scheme reliability. The calculation information is more comprehensive and the result is more accurate than traditional ones. IEEE 14-bus example reveals the effectiveness of this method. It can provide a useful reference for the design of under voltage load shedding schemes.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217908).

Key words: under voltage load shedding; load shedding amount; reliability; risk

附录 A IEEE 14 节点系统

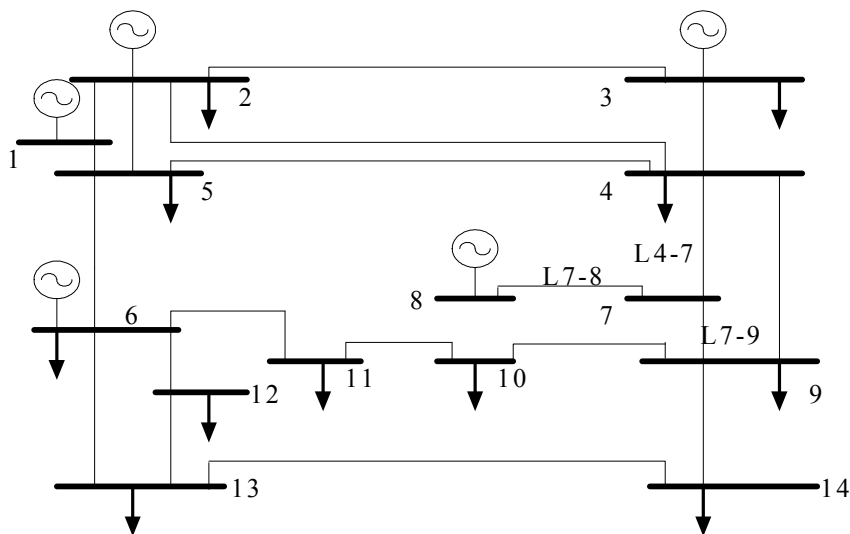


图 A1 IEEE 14 节点连接图

Fig.A1 Connection diagram of IEEE 14-bus system

图中标号 1—14 表示 14 条母线的编号, L4-7, L7-8, L7-9 分别表示与母线 7 与母线 4, 8, 9 相连的 3 条线路。其发电机, 线路和负荷的参数利用文献[13]所介绍的一种 MATLAB 工具包 PSAT 调出该算例查得, 这里从略。

附录 B 马尔可夫状态转移

按正文图 2 中各逻辑门从左到右、从上到下所对应的故障组合顺序, 如故障组合为 0112 表示左边第一个与门正常工作, 中间的 2 个与门输出恒为 1, 最后一个或门输出恒为 0。于是可得到状态 $S_0 \sim S_{80}$ 分别对应的故障组合为:

0000, 0001, 0010, 0100, 0002, 0020, 0200, 1000, 2000, 0011, 0101, 0110, 0021, 0201, 0012, 0102, 0210, 0120, 1001, 1010, 1100, 2001, 2010, 2100, 0022, 0202, 0220, 1002, 1020, 1200, 2002, 2020, 2200, 0111, 0211, 0121, 0112, 1011, 1101, 1110, 2011, 2101, 2110, 0221, 0212, 0122, 1021, 1201, 1012, 1102, 1210, 1120, 2021, 2201, 2012, 2102, 2210, 2120, 0222, 1022, 1202, 1220, 2022, 2202, 2220, 1111, 2111, 1211, 1121, 1112, 2211, 2121, 2112, 1221, 1212, 1122, 2212, 2122, 2221, 1222, 2222。

上面故障组合所对应的状态解释为:如故障组合 0102,为从左到右、从上到下所数的第 16 个故障组合,表示的状态为 S_{15} 。其他的故障组合所对应的状态与此类似,不再一一详述。结合正文中表 1 的故障率,并认为各逻辑门发生故障的概率相互独立,且具有无记忆性。将状态发生转移时间间隔取得足够的小,文中取为 1 天。从表 1 的数据可看出,此时 λt 已经相当小,可将该段时间中发生 2 次或多次转移的概率忽略不计。可利

用文献[15]第 8 章和第 9 章介绍的方法构造状态转移矩阵 $\mathbf{B}$, 其中第 i 行第 j 列元素 B_{ij} 为从状态 S_i 到 S_j 的转移率。实施状态转移, 进行矩阵相乘, 得到最终停留在各个状态的概率。再根据文献[7]的方法, 结合图 2 所示的各逻辑部件的相互关系和故障模式组合, 得到事件 X_1 (即输入信号为 1, 输出信号为 1, 方案正确动作) 所包含的状态如下:

$$S_0, S_1, S_2, S_3, S_5, S_6, S_7, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{16}, S_{17}, S_{18}, S_{19}, S_{20}, S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{28}, S_{29}, S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{37}, S_{38}, S_{39}, S_{40}, S_{41}, S_{42}, S_{43}, S_{46}, S_{47}, S_{50}, S_{51}, S_{52}, S_{53}, S_{56}, S_{57}, S_{65}, S_{66}, S_{67}, S_{68}, S_{70}, S_{71}, S_{73}, S_{78}$$

例如: 状态 S_{20} , 由上面的分析知它所对应的故障模式组合为 1100 (即图 3 中第一个与门与中间并列与门中的一个输出恒为 1, 其他 2 个门为正常工作), 当输入信号为 1 时, 根据逻辑关系其输出为 1, 即包含在事件 X_1 中, 其他的状态也可按此解释。

事件 X_3 (即输入信号为 0, 输出信号为 1, 方案误动) 包含的状态如下:

$$S_1, S_2, S_3, S_7, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{16}, S_{17}, S_{18}, S_{19}, S_{20}, S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{28}, S_{29}, S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{37}, S_{38}, S_{39}, S_{40}, S_{41}, S_{42}, S_{43}, S_{46}, S_{47}, S_{50}, S_{51}, S_{52}, S_{53}, S_{56}, S_{57}, S_{65}, S_{66}, S_{67}, S_{68}, S_{70}, S_{71}, S_{73}, S_{78}$$

其所包含状态的解释与前面 X_1 的解释类似, 就不再详述。再结合前面计算的停留在各个状态的概率, 将事件 X_1 和 X_3 所包含的状态的概率分别对应相加, 即得到正文中式 (24)、式 (25) 的计算结果。