

基于馈线分块等值的中压配电网 可靠性评估改进 FMEA 法

任 倩¹, 张勇军¹, 任 震¹, 汪穗峰^{1,2}

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;
2. 广东电网公司 广州番禺供电局, 广东 广州 511400)

摘要:以契合配电网运行实际的故障模式后果分析法(FMEA)为基本原理,结合近年来应用较为广泛的等值法,提出了一种以馈线为对象的配电网可靠性分块算法。该算法以线路块和负荷块为分析元进行等值,减少了以往以元件为分析元时的繁琐计算;而后对等值后的模块进行故障模式后果分析,由此计算出各个负荷点的可靠性指标并进一步得到系统的可靠性指标。该法考虑了装置不可靠动作、备用电源、计划检修等多种情况。通过一条实际馈线的计算,证明了该方法是一种有效的配电网可靠性解析算法,更能适应自动化开关普及的系统。

关键词:配电网; 可靠性; FMEA

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0053-04

0 引言

随着发、输电系统的日益可靠与稳定,作为直接联系电力用户的最末端,配电网故障逐步主导了用户的停电事故^[1-3],其可靠性已经同用户的停电损失估计联系了起来^[4-5]。现今研究配电网可靠性的方法主要有解析法和模拟法^[6-7]。解析法中,故障模式后果分析 FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) 法^[8-9]概念清晰,但在计算大规模配电网时会出现维数灾;等值法^[10-11]对配电网进行了有根据的等值,简化了可靠性计算,多用于评估复杂配电网。此外,文献[12]提出配电网可靠性要考虑电压暂降的问题,引入了潮流计算;文献[13]着重考虑了配电网拓扑的影响;文献[14]给出一种编制配电网可靠性程序的思路。这些方法均以元件为单位进行分析,在评估大规模配电网中变得复杂。

配电网可靠性除受元件自身影响外,主要与故障隔离方式及开关位置有关^[15]。为提高系统的可靠性,且考虑到城市美观和配电网改造的可持续性,电网公司在负荷点配电房处设置熔断器和负荷开关,在每条线路的终端设置手动开关。大量的规范化的开关在馈线内部形成边界,使得可靠性分析的模块化成为可能。现根据这种特性,提出一种以分块和等值为基础的改进 FMEA 法。该法采用 VB 和 Access 数据库通过 ADO 访问技术编程实现,编制的程序通用性好效率高。

1 馈线分块

中压配电网指标称电压为 10 kV(6 kV)级的配

电网。组成中压配电网的主要元件包括:断路器、熔断器、隔离开关、负荷开关、电缆、架空线、变压器、母线等。如果将所有元件分为开关装置和非开关装置,那么,非开关装置仅仅以自身的情况影响系统的可靠性,开关装置除此外还以开断特性对可靠性造成影响。将开关装置分为 3 类:第 1 类是自动开关,包括断路器、熔断器等在故障发生时能够自动动作切除故障的装置,它们决定故障在网络中的扩散情况,影响负荷点的故障率;第 2 类是手动开关,包括隔离开关和负荷开关(负荷开关具有一定的开断电流能力,但是不能开断故障电流,因无继电保护整定,故在此作为手动开关处理),它们虽然不能降低负荷点的故障率,但将影响负荷点的故障类型和停电时间;第 3 类是联络开关,故障后,通过联络开关的倒闸操作可以恢复部分或全部负荷的供电。

开关装置的布置要符合我国现代中压配电网敷设的实际。断路器因额定电压高、价格昂贵,基于安全和经济的考虑,在中压配电网中一般只集中布置于 110 kV 或 220 kV 变电站中。熔断器只与负荷开关组合,在用户配电房处配置。当用户容量较大时,也偶有以低压小车式断路器代替两者的情况出现。为在检修时或故障跳闸后形成明显的断点,所有有邻接线路段的线路段终端均安装有隔离开关或负荷开关,以作分段开关之用(此用途的负荷开关多安装在配电房中)。具体实例参见图 1。

根据上述开关装置对可靠性的影响情况和在配电网中的布置惯例,对馈线进行分块。负荷开关加熔断器(或小车式断路器)用以开断配电房以下的元件故障,在此范围内的元件归为负荷点类(LP);断路器用以开断变电站出线侧至负荷点的线路故障,在此范围内的元件归为线路类(L)。即,{用户变压器、熔断

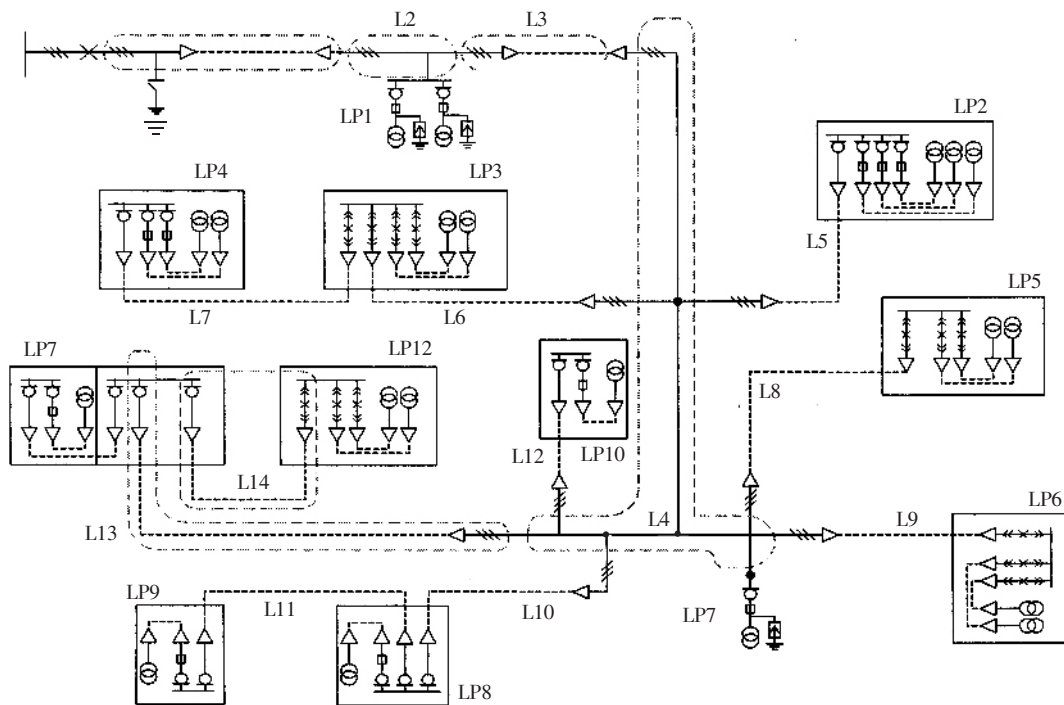


图 1 中压配电网中一条实际馈线

Fig.1 A real feeder of mid-voltage distribution system

器及其配套的负荷开关、小车式断路器 $\in \Omega_{LP}$ 、线路段、分段开关 $\in \Omega_L$ 。相同类里再细分为不同的块。一个独立的配电房即是一个负荷块,连接于同一母线的室外配电装置同属一个负荷块。以手动开关为界,故障处理时可进行开关操作的最小线路单元为一个线路块。相邻 2 条线路段有 2 个分段开关分隔时,各开关归属于较近的线路块;相邻 2 个线路段只有一个分段开关分隔时,此开关归属于前一个线路块。图 1 中以闭合虚线圈给出了线路块的几个典型的分块示例。这样分块的理由是:所有的线路块,即使是众多分支的干线或分线箱,如图 1 中的 L4 都只有 1 或 2 个分段开关,情况简单、易于分析。需要注意的是,虽然按此规则进行划分,但实际上在故障时线路终端都是有分段开关可以操作的。

2 算法

算法可分为分块等值和故障模式后果分析 2 大步骤:馈线分块完毕后,先由元件的基本参数根据等值法算出线路块和负荷块的等值故障率,再对各模块进行故障模式后果分析,算出负荷点的可靠性基本指标及其他配电网专用指标。

2.1 分块等值

配电网内的元件采用三状态模型:正常运行状态、强迫停运状态和计划检修状态。将计划检修状态和强迫停运状态合并成故障状态,得到元件的两状态模型:

$$\lambda = \lambda' + \lambda'' \quad (1)$$

$$t_r = (\lambda' t_r' + \lambda'' t_r'') / \lambda \quad (2)$$

式中 λ 、 λ' 和 λ'' 分别为元件的故障率、强迫停运率和计划检修率; t_r 、 t_r' 和 t_r'' 分别为元件的故障修

复时间、强迫停运时间和计划检修时间。

设负荷块的等效故障率及等效年停电时间分别为 λ_{LP} 和 t_{LP} ,则

$$\lambda_{LP} = \sum_{k=1}^m n_k \lambda_k \quad (3)$$

$$t_{LP} = \sum_{k=1}^m n_k \lambda_k t_{rk} \quad (4)$$

式中 m 为负荷块中元件的种类数($\in \Omega_{LP}$); n_k 为 k 种元件的个数; λ_k 和 t_{rk} 分别为 k 种元件的故障率和故障修复时间。

令线路块的等效故障率及等效年停电时间分别为 λ_L 和 t_L ,则

$$\lambda_L = \lambda_{L0} l + n_s \lambda_s \quad (5)$$

$$t_L = \lambda_{L0} l t_{L0} + n_s \lambda_s t_{rs} \quad (6)$$

式中 λ_{L0} 为线路的单位长度故障率,分架空线和电缆 2 种; l 为线路段的长度; t_{L0} 为线路段的故障修复时间; n_s 为线路块中分段开关的个数; λ_s 和 t_{rs} 分别为分段开关的故障率和故障修复时间。

2.2 故障模式后果分析计算负荷点年停电频率指标

定义 F 为负荷点年停电频率指标。负荷块编号为 i ,线路块编号为 j ,分析对象为负荷点 k ($k \neq i$)。正常运行时,除联络开关外的各开关常闭,任意线路块 j 与 k 点为串联关系,只要 j 发生故障, k 点就会停电。任意负荷块 i 与 k 点的逻辑关系相同,仅需附加考虑熔断器的作用,即只有当 i 点故障且熔断器没有熔断的情况下, k 点才会停电。故负荷点 k 的年停电频率 F_k 可表示为

$$F_k = \lambda_{be} + \sum_{j=1}^m \lambda_{Lj} + (1-p) \sum_{i=1, i \neq k}^n \lambda_{LPi} + \lambda_{LPk} \quad (7)$$

式中 λ_{line} 为馈线首端断路器的故障率; m 为线路块总数; n 为负荷块总数; p 为熔断器(或小车式断路器)的可靠开断概率,熔断器完全可靠时 $p=1$,其他负荷块故障不影响 k 点故障率。

2.3 故障模式后果分析计算负荷点年期望停电时间指标

定义 D 为负荷点年期望停电时间指标, D_k 表示负荷点 k 的年期望停电时间。将各模块分为负荷点自身(k)、其他负荷点(i)、线路(j) 3 类,分别进行故障模式后果分析,确定其对分析对象 D_k 的贡献。

a. 负荷点 k 。 k 点内部元件的故障一定导致 k 点供电中断。设 D_{kk} 为 k 点自身故障时引起的停运时间,则 $D_{kk}=D_{\text{LP}k}$ 。

b. 其他负荷块 i 。只有当 i 点故障且熔断器未熔断时才会造成 k 点停电。若定义 D_{ki} 为负荷块 i 故障时导致负荷点 k 停电的时间,则 $D_{ki}=(1-p)t_{\text{LPI}}$ 。

c. 线路块 j 。定义 1:若电流从馈线始端经线路块 j 流入负荷块 k ,则称 j 处于 k 的网流前向;若电流不经线路块 j 即达负荷块 k ,则称 j 处于 k 的网流后向。定义 2:若 k 处配电房内有引入其他馈线且开关常开,则称 k 点有备用电源。

设 D_{kj} 为线路块 j 故障导致负荷点 k 停运的时间。当 j 位于 k 的网流前向,且 k 无备用电源,线路无联络开关时, j 故障必定导致 k 点供电中断,故 D_{kj} 等于 j 的等效年停电时间 $t_{\text{L}j}$ 。若 j 位于 k 的网流前向,且 k 无备用电源,线路有联络开关, j 点故障时将先打开故障点 j 与 k 点之间的分段开关,再合上联络开关由另一侧馈线供电,因此 D_{kj} 应等于联络开关的倒闸时间。同理,若 j 位于 k 的网流前向, k 有备用电源,线路无联络开关,则 D_{kj} 等于备用电源投入时间;若 j 位于 k 的网流前向,且 k 有备用电源,线路有联络开关,则 D_{kj} 等于联络开关倒闸时间与备用电源投入时间中的小者。当 j 发生故障时,若 j 位于 k 的网流后向,则无论有无备用电源,线路有无联络开关,只需断开故障处的分段开关即可恢复主电源的供电, D_{kj} 为分段开关操作时间。

在某些非常重要的负荷点处可能会配备 UPS 或柴油发电机。UPS 的切换时间一般不超过 10 ms,柴油发电机的投入时间为秒级,以此保证负荷点的不间断供电。故可基本认为此类负荷点的 F 和 D 为 0。

另外,主电源发生故障时备用电源或联络线同时故障的情况为稀有概率,不予考虑。综合上述 3 类

模块的故障模式后果分析结果,可得负荷点可靠性基本指标中的停电时间指标 D_k :

$$D_k=\sum D_{kk}+\sum D_{ki}+\sum D_{kj}$$
 (8)

定义 R 为供电可靠概率指标,有

$$R_k=1-D_k/8760$$
 (9)

最后,根据所有负荷点的 F 、 D 和用户数算出系统平均停电频率指标(SAIFI)、平均可用率指标(ASAI)等配电网可靠性专用指标。

3 算例

以广州供电公司下辖某区 F34 易兴线为例,采用基于数据库编制的可靠性计算软件进行验算。其线路结线图见图 1,图中实线为架空线,虚线为电缆,线路长度见表 1。线路为工业区供电,负荷点均为工业用户,用户数为 1。元件可靠性基本参数见表 2,熔断器可靠熔断。按照前述分块方法将馈线分为 14 个线路块和 12 个负荷块。分别对以下 3 种情况进行计算,列出部分结果(见表 3、4):

情况 1 线路无联络开关,各负荷点无备用电源(线路目前的实际情况);

情况 2 线路有联络开关,各负荷点无备用电源;

情况 3 线路无联络开关,负荷点 LP5 引入其他馈线分支作备用。

表 1 线路结构及长度
Tab.1 Feeder data

<i>n</i>	<i>N</i>	<i>l/m</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>l/m</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>l/m</i>
1	0	188	6	4	150	11	10	132
2	1	460	7	6	83	12	4	170
3	2	120	8	4	205	13	4	252
4	3	1785	9	4	65	14	13	405
5	4	120	10	4	93			

注: n 为线段编号, N 为前接线路, l 为编号线路长度; 前接线路为 0 代表此线路为变电站出线, 接断路器。

表 2 元件可靠性基本参数
Tab.2 Component data

元件类型	λ'	t'_r/h	λ''	t''_r/h	t_c/h
隔离开关	0.12	4.0	0.48	2	0.5
熔断器	0.80	0.5	2.40	0.15	—
断路器	0.05	3.5	0.20	2	—
负荷开关	0.15	3.5	0.60	2	0.5
变压器	0.48	4.0	0.96	2	—
架空线	9.00	4.0	18.00	4	—
电缆	4.50	4.0	9.00	4	—

注: λ' 为每 100 千米·年的元件故障率; λ'' 为每百台·年的计划检修率; t_c 为切换时间。

表 3 部分负荷点可靠性指标
Tab.3 Load-point reliability indexes

情况	LP1		LP2		LP5		LP7	
	$F/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$D/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$	$F/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$D/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$	$F/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$D/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$	$F/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$D/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$
1	1.71767	1.44543	1.73207	3.30115	1.71767	3.27614	1.70327	3.15325
2	1.71767	0.96901	1.73207	1.14350	1.71767	1.10159	1.70327	1.05125
3	1.71767	1.44543	1.73207	3.30115	1.71767	3.19675	1.70327	3.15325

表 4 系统可靠性专用指标

Tab.4 Speed indexes of system reliability

情况	SAIFI/(次·a ⁻¹)	SAIDI/(h·a ⁻¹)	CAIDI/(h·a ⁻¹)	ASAI/%
1	1.71287	3.11334	1.81761	0.99964
2	1.71287	1.07641	1.62842	0.99987
3	1.71287	3.10672	1.81375	0.99965

注:情况 2、3 时,联络开关倒闸时间为 0.75 h,备用电源投入时间为 0.5 h。

从分析计算结果可知,增加备用电源或联络线只能改善负荷点的年停电时间指标。欲减少停电次数必须降低系统元件的故障率。降低计划检修的频次,强迫停运发生的频次就会升高,需找到最优点使元件的故障率最低,以降低负荷点的 λ 和 SAIFI。加装联络开关可使两侧的线路互为备用,改善 2 条线路的可靠性,因此最为经济。在负荷点引入其他馈线只能改善此点的停电时间指标,对其他负荷点不造成影响。情况 2、3 均通过对负荷点停电时间的影响来改善系统平均停电持续时间指标 (SAIDI)、用户平均停电持续时间指标 (CAIDI)、ASAI。

4 结论

根据配电馈线中开关的位置和配电网故障处理方式,提出了以馈线为对象,将网络划分为线路模块和负荷模块的分块思想。给出了馈线分块等值的数学模型,并在此基础上进行 FMEA 分析,求取系统的可靠性指标。因采用模块为分析元,所以避免了以元件为分析元时的繁琐计算,其模块化的分析思想适于开发基于数据库的可靠性计算软件。

通过文中的计算结果可知,联络开关及备用电源的存在并不能影响系统的停电频率,仅能改善系统的停电时间。

参考文献:

- [1] 任震,梁振升,黄雯莹. 考虑相关故障的双回平行输电线路可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2005,25(6):14-16.
REN Zhen,LIANG Zhen-sheng,HUANG Wen-ying. Reliability evaluation of two parallel transmission lines with respect to relevant fault[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(6):14-16.
- [2] 雷秀仁,任震,陈碧云,等. 电力系统可靠性评估的不确定性数学模型探讨[J]. 电力自动化设备,2005,25(11):5-7.
LEI Xiu-ren,REN Zhen,CHEN Bi-yun,et al. Study on uncertainty math models of power system reliability evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(11):5-7.
- [3] BILLINTON R,BILLINTON J E. Distribution system reliability indices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(1):561-568.
- [4] WANG P,BILLINTON R. Reliability benefit analysis of adding WTG to a distribution system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2001,16(2):134-139.
- [5] BILLINTON R,WANG P. Reliability worth of distribution system network reinforcement considering dispersed customer cost data[J]. IEE Proc-Gener Transm Distrib,1999,146(3):318-324.

- [6] GEOL L,BILLINTON R. Evaluation of interrupted energy assessment rates in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1991,6(4):1876-1882.
- [7] 丁明,张静,李生虎. 基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型[J]. 电网技术,2004,28(3):38-42.
DING Ming,ZHANG Jing,LI Sheng-hu. A sequential Monte-Carlo simulation based reliability evaluation model for distribution network[J]. Power System Technology,2004,28(3):38-42.
- [8] BILLINTON R,ALLAN R N. Reliability evaluation of power system[M]. New York,USA:Plenum Press,1984.
- [9] 张鹏,郭永基. 基于故障模式影响分析法的大规模配电系统可靠性评估[J]. 清华大学学报:自然科学版,2002,42(3):353-357.
ZHANG Peng,GUO Yong-ji. Large scale distribution system reliability evaluation based on failure mode and effect analysis[J]. Journal of Tsinghua Univ:Sci & Tech,2002,42(3):353-357.
- [10] 万国成,任震,田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):48-52.
WAN Guo-cheng,REN Zhen,TIAN Xiang. Study on model of reliability network equivalent of distribution system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(5):48-52.
- [11] 别朝红,王锡凡. 配电系统的可靠性分析[J]. 中国电力,1997,30(5):10-13.
BIE Zhao-hong,WANG Xi-fan. Reliability analysis of distribution networks[J]. Electric Power,1997,30(5):10-13.
- [12] 杨京燕,倪伟,肖湘宁,等. 计及电压暂降的配网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2005,25(18):28-33.
YANG Jing-yan,NI Wei,XIAO Xiang-ning,et al. Reliability evaluation of distribution network considering voltage SAGS[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(18):28-33.
- [13] 徐珍霞,顾洁. 一种配电网拓扑分析方法及其在可靠性评估中的应用[J]. 继电器,2005,33(19):41-44.
XU Zhen-xia,GU Jie. A topology analyzing method for distribution network and its application in distribution system reliability evaluation[J]. Relay,2005,33(19):41-44.
- [14] 徐其迎,李日隆,陈树挺. 一种基于 VB 编程的配电网可靠性评估算法[J]. 电网技术,2004,28(3):48-51.
XU Qi-ying,LI Ri-long,CHEN Shu-ting. A new reliability evaluation method for distribution system implemented by Visual Basic[J]. Power System Technology,2004,28(3):48-51.
- [15] 谢堂华,王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠评估[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):35-39.
XIE Ying-hua,WANG Cheng-shan. Reliability evaluation of medium voltage distribution system based on feeder partition method[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):35-39.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

任倩(1984-),女,河南新乡人,硕士研究生,研究方向为电力系统可靠性(E-mail:christblue@gmail.com);

张勇军(1973-),男,广东紫金人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统电压稳定和无功优化、电力系统可靠性;

任震(1938-2007),男,江苏宜兴人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统可靠性、小波理论及其在电力系统中的应用、高压直流输电及谐波分析等;

汪穗峰(1973-),男,广东广州人,博士研究生,研究方向为电力系统可靠性。

Improved FMEA method for reliability evaluation of mid-voltage distribution system based on divided feeder equivalence

REN Qian¹, ZHANG Yong-jun¹, REN Zhen¹, WANG Sui-feng^{1,2}

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Panyu Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 511400, China)

Abstract: A distribution system reliability evaluation method based on FMEA(Failure Modes and Effects Analysis) is presented, which combines with widely-used equivalence method and divides feeder into line sections. Instead of components, it takes line sections and load sections as analytic elements for equivalence to simplify the calculation. The failure mode and effect analysis is carried out for these equivalent mathematic models to evaluate the reliability indexes of load points and whole system. Different conditions are considered, such as improper operations of automatic equipment, backup power supply and scheduled maintenance. Example calculation of a real feeder verifies it an effective analytic arithmetic of distribution system reliability, more suitable for those systems with diffusive automatic switches.

This project is supported by the Natural Science Foundation of China(50337010).

Key words: distribution system; reliability; FMEA