

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.021

电网状态检修决策研究*

敖蕾蕾¹, 王慧芳^{1*}, 杜振东²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力公司 经济技术研究院, 浙江 杭州 310008)

摘要:针对单设备的状态检修决策结果有时不能满足电网安全运行要求的问题,从电网整体运行角度,提出了电网状态检修的概念,建立了基于 D-S 证据理论的电网状态检修决策模型。考虑到设备之间、设备与电网之间的实时关联性,归纳出了电网状态检修决策的指导原则,并对所有待修设备在个体决策层面得到的可能检修方案依据原则进行了组合与筛选,得到了电网状态检修的可能方案集合,然后建立了能够全面反映电网整体运行安全性、可靠性和经济性的决策指标,并给出了量化方法;将上述相互独立的指标作为证据理论的证据源,将各方案下指标的标准化值作为证据理论的 BPA 值,采用上述决策模型对电网状态检修可能方案进行了决策寻优。算例结果表明,最终的检修方案可以使设备个体与电网的整体安全运行达到综合最优。

关键词: 电网; 状态检修; 决策指标; D-S 证据理论

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)05-0639-05

Research on condition based maintenance for power transmission system

AO Lei-lei¹, WANG Hui-fang¹, DU Zhen-dong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. The Economic and Technical Research Institute, Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310008, China)

Abstract: Aiming at the safe and statistical operation requirements of the power transmission system cannot be met by condition based maintenance (CBM) decision-making results for individual device, from an entire system prospect, the concept of CBM for power transmission system was proposed, and a maintenance decision-making model based on D-S evidence theory was established. Under the consideration of the real-time correlation between the devices, and the system both, the guiding principles were also summarized which are the basic of the combination and selection of all possible schemes based on the individual decision-making, and then the collection of the possible schemes of the system can be selected out. Then, the decision-making indicators which are the reflection of the safety, reliability and economy of the power transmission system were established, and their quantitative methods were given. The optimal scheme can be selected out by the established model of which the evidences are these independent indicators and the BPA values are the normalized values of the indicators beneath each possible scheme. The numerical result shows that, the individual equipment and the entire power transmission system are both on a safety operation level.

Key words: power transmission system; condition based maintenance (CBM); decision-making indicators; D-S evidence theory

0 引言

设备状态检修决策是基于设备当前状态评价结果进行的检修方案优选^[1-2], 通常包括检修方式和检修时

段的确定, 这方面已经取得了不少研究成果^[3-7]。然而电网中的设备并不是孤立存在的, 设备之间有着不可分割的物理结构联系、经济联系和随机联系^[8-9], 这将导致单个设备在分别实施状态检修时, 可能出现降低

收稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107112)

作者简介: 敖蕾蕾(1989-), 女, 江西吉安人, 主要从事电力系统状态检修方面的研究。E-mail: audreyao@zju.edu.cn

通信联系人: 王慧芳, 女, 副教授, 硕士生导师。E-mail: huifangwang@zju.edu.cn

电网整体运行效能的情况。此外,不断增加的电网设备数量与检修所需资源有限的矛盾也日益突出。因此,从电网角度看,单个设备的最优检修决策并不一定是真正的最优。如何协调设备状态检修与电网安全运行之间的关系,在合理使用检修资源前提下做好电网中多个设备的协调检修决策是今后研究的重点。

目前,状态检修决策研究多集中在设备层面,涉及设备联合检修的研究还较少。文献[10]将发输电设备联合检修计划问题分为多目标整数规划和随机规划两大问题进行分散协调,将考虑到发电、输电设备之间联系的问题作为主问题,考虑到设备与系统之间联系的问题作为子问题,分别采用改进的隐枚举法和基于直流潮流的发输电组合系统可靠性评估模型求解,得到设备的检修时段;文献[11]通过同时检修、互斥检修、资源、电网安全等限制条件约束相互关联的设备,综合考虑设备状况与电网运行情况,采用禁忌搜索算法优化了整个电网中输变电设备的检修起始时段;文献[12]提出了电网状态检修的概念,通过概率的引导来相互牵制设备检修、运行及电网整体性能,建立了电网状态检修的风险模型,得出设备的检修时段。上述研究主要集中在对检修时段的决策上,还没有对设备检修方式进行决策研究。

本研究在考虑输变电设备个体之间、设备与电网之间关系的基础上,明确电网状态检修概念,研究电网状态检修过程,提出电网检修决策指导原则和决策指标;然后基于单个设备检修决策结果,建立检修方式和检修时段同时决策的多设备检修决策模型,实现个体设备检修与电网整体运行效能的综合最优决策。

1 电网状态检修

1.1 电网状态检修概念

设备是否检修、何时检修、采用何种方式检修不仅与设备自身健康状态有关,还受电网结构、运行方式等影响,由此形成了电网状态检修的概念。电网状态检修是以设备个体状态检修决策结果为基础,综合考虑设备个体性能、设备个体之间的关联性、设备个体与电网整体运行之间的关系,根据一定的评价指标,协调所有设备的检修方案,以实现设备个体与电网整体运行的综合最优。

1.2 电网状态检修决策过程

电网状态检修决策过程如图1所示。

电网状态检修决策包括检修基础层和检修决策层。在检修基础层,研究者根据设备与设备之间、设备

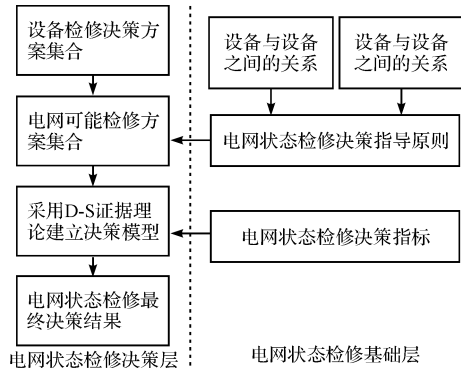


图1 电网状态检修决策过程

与电网之间的关系建立电网状态检修决策的指导原则。从前述电网状态检修概念可知,电网状态检修是一个多目标多约束的决策问题。综合检修过程中涉及到的目标和约束,可建立能够全面反映电网安全、可靠、经济运行的指标集合。在检修决策层,研究者根据检修基础层的指导原则,将已知的待检修设备方案进行组合和筛选,得到电网可能的检修方案集合;然后采用D-S证据理论建立决策模型,得到电网检修的最终决策结果。

2 电网状态检修决策模型

2.1 电网状态检修决策指导原则

(1) 同时检修原则。

该原则包含2个方面的含义:①处于同一检修间隔或检修范围内的设备应该尽量安排同时检修以避免重复停电;②上、下级电网统一检修,即上级电网检修时,下级电网的检修工作需要积极配合,以减少停电时间和停电范围。

(2) 互斥检修原则。

为避免在检修实施过程中造成大量负荷缺失,甚至形成电气孤岛,尽量不安排处于同一供电节点的设备同时检修。

(3) 检修时间约束原则。

检修时间约束主要有3个方面的含义:①检修时间的分布。为了尽量减少设备检修引起的电网供电不足,应该尽可能将检修工作安排在负荷低谷时段,同时,保证设备检修不超过期望检修时限^[13];②检修时间的连续性。设备一旦停电检修,不允许中途将设备投入运行,之后再安排检修;③检修时间的合理性,尽量避免调整上月延续到本月的检修和故障检修的起始时间。

2.2 电网状态检修决策指标

本研究对各设备的可能检修方案进行组合得到电

网初始检修方案,依据上述3个检修指导原则,删除违反原则的方案,得到电网可能的检修方案集合。如何在上述可能方案中决策出使电网安全可靠经济运行的最优解,还需要建立可以全面反映电网运行安全性和检修经济性的指标来进行决策。通过分析和综合,本研究拟采用电网健康状态、电网运行损失、电网检修资源3个指标全面反映电网状态检修的安全性、可靠性和经济性。

(1) 电网健康状态 c_1 。目前,健康状态的评价对象主要集中在设备层面,通过在线监测装置对设备的电气量实时在线监测,结合设备的各种运行、巡视、带电测试、预试记录等基础数据对设备进行状态评价,得出设备当前健康状态。由于电网是由各种设备构成的一个综合的复杂拓扑,设备是电网的基本组成元件,电网的健康状态也是由各个设备的健康状态耦合得来。由于状态良好的设备对电网健康状态不会产生不良影响,本研究的电网健康状态评价将只考虑处于不良状态的设备。按照设备健康状态评价思路,可将设备看成组成电网的各个“部件”,考虑到设备存在重要性差异,给每个设备按照其重要性赋予相应的权重系数,得到电网的健康状态分值为:

$$c_1 = \sum_{k=1}^N \omega_k S_k \quad (1)$$

式中: N —电网中处于不良运行状态的设备数, ω_k —设备 k 的权重系数, S_k —设备 k 的健康状态分值。

根据文献[14],可以预测设备在经历不同检修方案后的状态,将其代入公式(1)则可预测电网检修后的健康状态。电网健康状态是电网运行安全性和可靠性的内在表现,有效反映了不同检修方案在电网运行性能方面恢复的优劣程度。

(2) 电网运行损失 c_2 。由于电网的复杂性,其可靠性本质上是一个取决于网络拓扑、运行方式、系统负荷和元件随机停运以及随机修复等诸多相关因素^[15]的指标变量。本研究为简化分析,将电网运行损失限定在电网供电不足引起的失负荷量上,侧重反映电网运行安全性和可靠性的外在表现。状态检修作为一种在设备故障前实施的预测性检修,引起的负荷缺失主要是计划失负荷量,可以采用如下直流潮流模型求解:

$$c_2 = \sum_{i \in N_c} P_{d,i} \quad (2)$$

约束条件:

①发电与负荷平衡约束:

$$\sum_{j \in N_g} P_{g,j} + \sum_{i \in N_c} P_{d,i} = \sum_{i \in N_c} P_{c,i} \quad (3)$$

②输变电设备有功传输约束:

$$L = A(P_g - P_c + P_d) \quad (4)$$

$$-L_{\max} \leq L \leq L_{\max} \quad (5)$$

③机组输出有功功率限制约束:

$$P_{g,\min} \leq P_g \leq P_{g,\max} \quad (6)$$

④失负荷量限制约束:

$$0 \leq P_d \leq P_c \quad (7)$$

式中: P_g, P_c, P_d —机组有功输出、节点负荷、失负荷向量; N_g, N_c —机组节点集合、负荷节点集合; i, j —机组节点、负荷节点编号; L, L_{\max} —输变电设备的有功传输、最大允许有功传输向量; A —输变电设备的有功功率和节点注入的有功功率间的关联矩阵; $P_{g,\max}, P_{g,\min}$ —机组的有功出力上、下限向量。

(3) 电网状态检修资源 c_3 。电网状态检修作为资产全寿命周期管理的重要组成部分,所要达到的目标已经不仅仅是提高电网的安全性和可靠性,检修经济性也同样需要得到保证。特别在当前不断增加的电网设备数量与检修所需资源有限的矛盾日益突出情况下,检修资源应该作为电网状态检修决策的一个重要指标。检修资源主要包括检修过程中所有设备所需人力资源和物力资源。

为计算方便,本研究将两种资源折合成经济指标,统一到同一量纲上加以衡量。

①人力资源。即检修过程中所需工作人员的检修力量。将其折合成经济指标,可以表示为检修人员人工成本和辅助工人工成本的和。人工成本为工日单价和检修所需工日的乘积。

②物力资源。综合起来看主要涉及到检修所需的材料储备和机械力量。可以表示为材料成本 r_3 和机械成本 r_4 的和。

因此,检修资源可表示为:

$$c_3 = \sum_k (r_{k1} \times \tau_{m1k} + r_{k2} \times \tau_{m2k} + r_{k3} + r_{k4}) \quad (8)$$

式中: $r_{k1}, r_{k2}, r_{k3}, r_{k4}$ —设备 k 检修所需检修人员、辅助工每工日人工成本、材料成本、机械成本; τ_{m1k}, τ_{m2k} —设备 k 检修所需检修人员、辅助工工日,与检修方式有关。

2.3 基于 D-S 证据理论的电网状态检修决策

2.3.1 识别框架和证据源确定

D-S 证据理论由于能够通过证据的积累和合成法则,不断缩小假设集,常常作为一种决策方法应用于多目标决策中。

假设备检修方案用 $D = (w, t)$ 表示(其中: w —检修方式, t —检修时段)。参考国家电网设备状态检修导则和状态检修的实际开展情况,设备状态检修方式可分为以下5类: $w = 1$ 为整体性检修; $w = 2$ 为局部

性检修; $w=3$ 为一般性检修; $w=4$ 为更换性检修; $w=5$ 为不停电检修。检修时段采用双周检修模式,设定检修初始时刻 $t=0$,以每两周为单位划分研究周期。若 $t=2$,表示从检修初始时刻算起的第 3~4 周,依此类推。若 $D=(1,3)$,表示设备在第 3 个检修时段采用整体性检修方式。

假设检修决策初始时刻有 m 台设备需要安排检修,根据已有的设备个体检修决策方法,可以得到第 k 个设备可能采取的检修方案集合为 $\{D_1^k, D_2^k, \dots, D_{L_k}^k\}$, ($k=1, 2, \dots, m$)。其中, L_k 为第 k 个设备可选检修方案的个数。将 m 台设备检修方案进行组合后,按照 2.1 节所述的检修指导原则对这些方案进行筛选,得到所有可能的方案集合为 A_1, A_2, \dots, A_N , 其中第 i 个可能方案 $A_i = \{D_{l_1}^1, \dots, D_{l_k}^k, \dots, D_{l_m}^m\}$, l_k 可取 $1 \sim L_k$ 中任意一个正整数, N 为电网状态检修可能方案的个数。该集合为证据理论的识别框架 Θ , 即 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ 。

从 2.2 节决策指标量化公式可以看出,各指标不仅能全面表征电网的安全性、可靠性和经济性,而且还与电网中每个设备的检修方式、检修时段相关。因此,可将这些相互独立的决策指标 (c_1, c_2, c_3) 作为证据理论的证据源。

2.3.2 BPA 分配

指标 c_j ($j=1 \sim 3$) 对应任意一个方案 A_i 都有一个具体量化值,反映了方案 A_i 作用于该指标的程度。笔者将方案 A_i 下指标 c_j 的值标准化得到 λ_{ij} 。 λ_{ij} 为指标 c_j 实际值与理想值的贴近程度,标准化值越大,表示对该方案的采纳意愿越强烈,信任程度越高。因此笔者将 λ_{ij} 定义为对方案 A_i 的决策偏好程度,客观反映在指标 c_j 下选取该方案的可能性大小,并将其作为 D-S 证据理论的 BPA。则证据源 c_j 对各个命题的可信度分配函数为:

$$\begin{cases} m_j(A_i) = \frac{1}{N} \lambda_{ij} \\ m_j(\Theta) = 1 - \sum_{i=1}^N m_j(A_i) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $m_j(A_i)$ —指标下方案 A_i 的信任度分配函数; $m_j(\Theta)$ —指标下没有指定到任何一个方案的信任度分配函数,表示对不确定的信任度分配。

2.3.3 证据合成与检修决策

本研究将所有证据源的信任度函数用 D-S 合成规则合成,得到 3 个证据源联合作用下对识别框架中方案 A_i 的信任度 $m(A_i)$ 。根据证据理论中信任度函数和似真度函数的定义,计算每个方案 A_i 的信度区间 $[Bel(A_i), Pls(A_i)]$ 和不确定的信任度分配 $m(\Theta)$, 然后根据下述决策规则得出最后结果。

本研究选取信任度最大规则^[16]: ①目标方案有最大的信任度分配,即 $Bel(X_1) = \max\{Bel(X_i), X_i \subset \Theta\}$; ②目标方案与其他方案的信任度差异足够大时,才能确认选择该方案,即 $Bel(X_1) - Bel(X_2) > \varepsilon_1, Bel(X_2) = \max\{Bel(X_i), X_i \subset \Theta, X_i \neq X_1\}$; ③不确定的信任度应该小于一定的阈值 ε_2 , 即 $Bel(\Theta) < \varepsilon_2$ 。根据本研究实际情况,分别选取阈值 ε_1 和 ε_2 为 0.03 和 0.2。同时满足以上规则才能得到最终的决策结果。

3 算例分析

以如图 2 所示的某局部电网为例。假设在本次检修决策初始时刻,变电所 II 和发电厂 A 的变压器运行状态良好;变电所 I 的两变压器状态劣化明显,并且在本次检修之前,经历过小修和消缺维护,但尚未大修。变压器 T_1, T_2 分别于 1998 年、2006 年投运,至今已分别在线运行 16 年、8 年。进线 L_1 的可靠度假设为 99%, 负荷节点 LP_1, LP_2 的负荷曲线通过负荷预测得到。

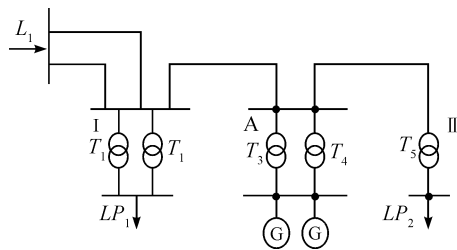


图 2 局部电网结构示意图

本研究通过由运行人员巡视检查和变电所状态监测提供的一系列基础数据,从设备个体检修决策的角度得到变压器 T_1 的检修方案从优到劣的排序为 (1, 2), (2, 3), (3, 3), 变压器 T_2 为 (5, 2), (3, 6), (2, 8)。若进行检修方案组合,可以得到 9 种电网状态检修初始决策方案。

本研究依据 2.1 节所述电网状态检修指导原则对上述方案进行筛选。待检修的两变压器符合互斥检修原则,不能将其安排在同一时段进行检修,假定第 3 个原则都满足,筛选后的电网状态检修决策可能方案有 8 种,即识别框架 $\Theta = \{(1, 2), (3, 6), ((1, 2), (2, 8)), ((2, 3), (5, 2)), ((2, 3), (3, 6)), ((2, 3), (2, 8)), ((3, 3), (5, 2)), ((3, 3), (3, 6)), ((3, 3), (2, 8))\}$ 。

按照本研究建立的 D-S 证据理论多目标决策模型,笔者首先计算各可行方案下电网状态检修决策指标值并标准化。然后在决策指标的指导下对方案进行识别并分配基本可信度 BPA,将 3 个证据源下的可信度函数用 D-S 合成法则合成后,计算各个可能方案的

信任度区间,其结果如表1所示。最后根据本研究的决策规则进行判断,得出最后的决策结果。

表1 指标联合作用下各方案的信度区间[Bel(A_i),Pls(A_i)]和决策结果

证据源	信度区间								结果
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	
c ₁ ,c ₂ ,c ₃	[0.094 9,	[0.144 8,	[0.068 4,	[0.113 1,	[0.174 9,	[0.028 4,	[0.063 6,	[0.119 9,	A ₅
联合作用	0.286 9]	0.336 8]	0.260 5]	0.305 1]	0.366 9]	0.220 4]	0.255 6]	0.311 9]	

从表1中可得,电网状态检修的决策结果为方案A₅ = ((2,3),(2,8)),即变压器T₁在第3时段采取局部性检修,变压器T₂在第8时段采取局部性检修。该方案下对应的电网指标标准化值为(0.675 4,1.000 0,0.938 2),是所有方案中使3个指标达到整体最优的解,特别是使第2个指标电网运行损失最小。

若按单个设备检修决策最优来讲,变压器T₁的检修方案为(1,2),变压器T₂的检修方案为(5,2),在同一个检修时段进行检修。本研究在该情况下计算相应的电网各个指标,可以得到标准化后的值为(0.558 4,0.000 0,0.798 9),电网健康状态和电网检修资源处于较低水平的同时,电网运行损失严重超出规定范围。可见在考虑到设备与设备之间关系、设备与电网之间关系时的电网状态检修决策时,达到单个设备层面的最优决策方案不一定是电网层面的最优检修方案,而需要综合考虑设备个体与电网整体运行。

4 结束语

在设备个体状态检修决策的基础上,本研究综合考虑待检修设备之间、设备与电网之间的关系,提出了电网状态检修的概念和指导原则,对电网中需要检修的设备个体决策方案进行组合与筛选;并提出了整个电网层面的检修决策指标,通过建立基于D-S证据理论的电网状态检修决策模型对可能的检修方案进行决策,实现了设备个体与电网整体运行的综合最优检修决策方案。

本研究提出的决策模型逻辑清晰,计算方法便于计算机实现,可以快速地实现电网状态检修决策。

参考文献(References):

[1] 黄雅罗,黄树红.发电设备状态检修[M].北京:中国电力出版社,2000.
 [2] 陈安伟.输变电设备状态检修的应用[J].电网技术,

2009,33(20):215-218.
 [3] 孙思培,徐习东.继电保护装置状态检修的可靠性研究[J].机电工程,2012,29(4):450-453.
 [4] 赵明欣,鲁宗相,吴林林,等.基于风险评估的输变电设备维修技术[J].电力系统自动化,2009,33(19):30-35.
 [5] 王佳明,刘文颖,魏帆,等.基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(5):77-80.
 [6] 潘乐真,鲁国起,张焰,等.基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J].电力系统自动化,2010,34(11):28-32,66.
 [7] 袁志坚,孙才新,李剑,等.基于模糊多属性群决策的变压器状态维修策略研究[J].电力系统自动化,2004,28(11):66-70.
 [8] Nicolai R P, Dekker R. Optimal Maintenance of Multi-Component Systems: a Review[R]. Erasmus Economic Institute,2006.
 [9] 王凌,郑恩辉,李运堂,等.维修决策建模和优化技术综述[J].机械科学与技术,2010,29(1):133-140.
 [10] 丁明,冯永青.发输电设备联合检修安排模型及算法研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):22-27.
 [11] 潘乐真,鲁国起,张焰,等.基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J].电力系统自动化,2010,34(11):28-32,66.
 [12] 李明,韩学山,杨明,等.电网状态检修概念与理论基础研究[J].中国电机工程学报,2011,31(34):43-52,6.
 [13] 蒋献伟.基于可靠性的供电设备检修计划优化的研究[D].杭州:浙江大学电气工程学院,2006.
 [14] 王一,王慧芳,张亮,等.基于效用和成本的状态检修维修方式选择研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):39-45.
 [15] 赵渊,谢开贵.电网可靠性指标概率密度分布的解析计算模型[J].中国电机工程学报,2011,31(4):31-38.
 [16] 陈增明.群决策环境下证据理论决策方法研究与应用[D].合肥:合肥工业大学管理学院,2006.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

敖蕾蕾,王慧芳,杜振东.电网状态检修决策研究[J].机电工程,2014,31(5):639-643.

AO Lei-lei, WANG Hui-fang, DU Zhen-dong. Research on condition based maintenance for power transmission system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(5):639-643.
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>