

基于模糊综合评判的直流输电系统检修时机选择方法

赖昱光¹,管霖¹,王滔¹,雷兵²,张蔓²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

摘要: 提出基于模糊综合评判的直流输电系统检修时机选择方法。通过选择和改进电网充裕度评估指标,构建模糊综合评判体系,得到直流输电系统在正常运行与直流通道停运时电网风险水平的变化,对模糊结果集进行分值量化和评语总结。根据直流通道的检修判据得到直流系统停运的建议方案。以2011年南方电网某天的直流检修安排为例,结果表明,该方法可有效辨识日运行方式下直流输电系统的检修时机,获得适合停运的时间段。

关键词: 模糊评判; 检修时机; 高压直流输电; 可靠性; 评估; 模糊理论; 风险

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.015

0 引言

高压直流输电已成为我国大区互联和电力大容量跨区域交换的主要方式。由于直流输电系统在500 kV及以上高压电网中的核心地位,经常存在设备维护部门希望停运消缺时,调度部门出于电网安全的考虑让直流通道带缺陷持续运行的情况。一旦直流隐患引发直流闭锁,对电网的危害程度和影响范围将更大。

根据我国电力可靠性中心公布的数据^[1-2],在直流输电系统处于轻载运行状态时,选择合适的时机安排检修维护工作不会对全网可靠性产生明显影响。文献[3-6]表明充分的计划检修工作虽降低了直流输电系统的运行时间,却能有效减少强迫停运次数。因此若能在电网运行风险较低的时段主动安排直流消缺,降低直流强迫停运的风险,则对提升电网的整体可靠性水平是有利的。为此就必须能定量评价不同运行时段发生直流停运对全网可靠性的影响,以便调度部门合理地选择直流输电系统的停电时机。

目前对检修策略的研究主要集中在故障检测和状态检修领域,如基于全寿命周期成本的设备状态检修理论^[7-8],对设备检修的安排仅考虑设备自身状况,并未考虑设备停运后对系统可靠性和安全性的影响。文献[9-11]提出基于电网风险理论的检修方案,但并未具体研究如何评价输电设备检修对电网风险的影响。文献[12-13]提出输电检修计划模型,从减少能耗角度优化计划检修方案。在技术方法上,层次分析和灰色理论等方法在决策中应用较好^[14-15]。

事实上,直流输电系统检修与电网安全运行是一种辩证的关系^[16-17]。一方面停运检修会短时增加电网安全运行的风险;另一方面它又提高了全系统在重载下的可靠性。协调直流输电系统检修和安全运行

之间矛盾的突破点在于认识直流检修时机的差异性对电力系统的影响。其核心技术是如何从全网可靠运行的角度构造评估指标和算法,量化直流输电系统停运的影响。

本文提出了一种模糊评价体系,以便全面和量化地评价直流停运对电网运行风险的影响。调度部门可以根据不同运行方式下直流停运增加的系统风险,合理评价和选择直流通道的检修时机。当系统运行风险低于阈值时,可考虑安排短时停运消缺,化被动检修为主动检修,达到在提升设备健康水平的同时提高电网的整体可靠性。

1 直流检修时机的模糊评价指标集的选择

模糊综合评判方法是基于模糊数学理论^[18]的多指标综合评价方法,它将 n 个评价目标分解成多因素构成的集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ (评价指标集),同时确定由 m 种评语构成的评语集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

评价电网充裕度的可靠性指标体系及其计算方法已被广泛研究^[19-20]。其中反映电网运行风险的主要指标有系统失负荷状态概率(LOLP)、削减负荷量指标(EENS)和系统过载频率等,其他可靠性指标皆由这3个指标衍化而来。然而这些指标不能直接应用于评估直流停运对电网运行风险的影响,原因如下。

a. 原指标是评价电网整体可靠性水平,扫描故障多,且难以涵盖直流停运对邻近区域发生小概率、高风险的 $N-k$ 故障的影响,难以满足调度要求。对直流的检修安排而言,更应关注的是直流停运前后的可靠性变化情况。由于直流停运主要影响与之并联的交流通道潮流和电压水平,可以有针对性地考察相关多重故障集合的影响。

b. 目前充裕度评估是将所有故障的指标进行加权求和^[20],由于缺少令人信服的多重故障概率模型,目前对多重故障概率多按独立单重故障的组合来测

算,导致其概率过低,尽管削减负荷量很大,加权后在可靠性指标中也难以体现。对日益关注连锁故障、偶发严重故障风险控制的电网运行部门而言,所得结果显然不够合理。

c. 直接采用上述确定性指标,无法判定所选取的直流停运风险阈值是否合理,而且对于不同电网该阈值不同,适用性较差。

因此本文针对直流检修安排的可靠性影响评估问题提出了以下几点。

a. 仅扫描潮流受直流停运影响较大的交流通道故障。对这些有限的通道线路最高可考虑 4 重故障组合构成扫描故障集。

b. 分别计算不同概率等级(故障重数)的故障的可靠性指标。对 $N-1$ 失负荷则不建议停运,对其他多重故障下的指标作为第二级评价指标。

c. 采用模糊数学的方法将确定性指标转化为评语集,以规避多重故障概率不够准确的问题。

d. 增加了系统过载频率指标,更能全面地评估电网的风险承受能力。

对于按上述原则确定任一概率等级的扫描故障集,可计算以下指标。

a. 系统失负荷状态概率。

系统失负荷状态概率表示系统发生失负荷的概率。在运行方式 ψ 下故障 k 发生的系统状态概率 $P_k(\psi)$ 为:

$$P_k(\psi)=\prod_{i=1}^{n_i} P_{Fi}(\psi)\prod_{i=1}^{n_d} P_{Di}(\psi)\prod_{i=1}^{n-n_i-n_d} (1-P_{Fi}(\psi)-P_{Di}(\psi)) \quad (1)$$

其中, n 为系统元件总数; n_i 和 n_d 分别为故障 k 中处于停运和降额状态的元件个数; P_{Fi} 为元件 i 的不可用率; P_{Di} 为元件 i 处于降额状态的概率。

设总故障集为 S , 故障 $k \in S$ 。以故障维度对故障集 S 进行分类,可得各类故障集合($N-1$ 、 $N-2$ 等)下的系统失负荷状态概率 $P_{S_m}(x, \psi)$:

$$P_{S_m}(x, \psi)=\sum_{k \in S_m} P_k(\psi) I_k(x, \psi) \quad m=1,2,3,4 \quad (2)$$

其中, m 为故障的阶数; S_m 为 m 阶故障所组成的故障集合; $I_k(x, \psi)$ 为在故障 k 下系统处于 x 状态的二值函数,其表达式如式(3)所示。

$$I_k(x, \psi)=\begin{cases} 1 & x \text{ 为系统处于失负荷状态} \\ 0 & x \text{ 为系统处于供电稳定状态} \end{cases} \quad (3)$$

b. 系统削减负荷总量。

系统削减负荷总量表示枚举故障状态后系统削减的有功负荷之和,设为 $L_{\text{loss}}(\psi)$ 。求取方法为:

$$L_{\text{loss}}(\psi)=\sum_{k \in S_m} L_k(\psi) I_k(x, \psi) \quad (4)$$

其中, $L_k(\psi)$ 为故障 k 的有功负荷削减量,若未发生失负荷,则为零。

c. 系统过载频率。

系统过载频率表示系统出现过载状态的频率,从故障个数上反映电网系统存在故障风险的程度。

各类故障集合下的系统过载频率 $F_{S_m}(\psi)$ 为:

$$F_{S_m}(\psi)=\sum_{k \in S_m} I_k(c, \psi)/N_m \quad m=1,2,3,4 \quad (5)$$

其中, N_m 为 m 阶故障集合中故障的个数; $I_k(c, \psi)$ 为故障 k 下系统处于 c 状态的二值函数,其表达式如式(6)所示。

$$I_k(c, \psi)=\begin{cases} 1 & c \text{ 为系统元件出现过载状态} \\ 0 & c \text{ 为系统保持热稳定状态} \end{cases} \quad (6)$$

如前文所述,为区别对待各重故障集合的风险评判结果,本文构建了双层次结构的评价指标集合 U : 选取以上 3 个指标构成第一级评价模型,以第一级模型中的评价指标为评价目标,以 $N-k(k \leq 4)$ 故障下的指标结果构成第二级评价模型。各级评判模型皆有各自的模糊映射关系。

针对电网运行风险、直流输电系统停运风险影响的模糊综合评判,确定评语集合 V 如表 1 所示。

表 1 模糊综合评判的评语集合 V
Tab.1 Comment set V of fuzzy comprehensive evaluation

评语等级	电网运行风险	直流停运风险影响
v_1	非常低	非常小
v_2	低	小
v_3	中	中
v_4	高	大
v_5	非常高	非常大

根据文献[9-20]理论研究成果,直流停运对电网可靠性影响的关键故障组合是并行于直流通道的交直流通道故障组合。本文选取与直流通道并行的交流通道上的输电线路构造多重故障集,用解析法枚举故障计算得到上述可靠性评估指标。

2 指标的模糊化

指标的模糊化包括对评价指标标准化和形成模糊评判矩阵 2 个步骤。

2.1 评价指标标准化

本文讨论的评价指标皆属于成本型指标。当数值结果越小,则电网运行的可靠性越高,模糊风险越低。指标数值标准化的方法为:

$$t'=(t-\min t)/(\max t-\min t) \quad (7)$$

其中, t 和 t' 分别为标准化前和标准化后的指标结果; $\min t$ 、 $\max t$ 分别为 t 的最小和最大值。

由式(7)可知,影响标准的关键在于选取数值的范围。为让评价结果客观,符合工程实际,本文选取近 2 年运行方式下最大和最小的评价指标结果作为指标最大值和最小值。

2.2 形成模糊评判矩阵

通过模糊映射 f 可将标准化后的评价指标 t' 变换为对应评价等级的隶属度,由所有评价指标的隶属度可构成体现 U 与 V 之间模糊关系的模糊评判矩

阵 $\mathbf{R}$ 。定义集合 U 中的单个评价指标 u_i 到评语集 V 的模糊变化为:

$$\tilde{f}(u_i) = \mathbf{R}_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{i5}) \quad (8)$$

其中, r_{ij} 为评价指标 u_i 隶属于第 j 个评语等级 v_j 的程度。所有评语等级的结果构成了模糊隶属向量 $\mathbf{R}_i$, l 个指标的模糊隶属向量 $\mathbf{R}_i$ 构成模糊评判矩阵 $\mathbf{R} = (\mathbf{R}_1^T, \mathbf{R}_2^T, \dots, \mathbf{R}_l^T)^T$, 本文取 $l=3$ 。

将上节得到的去除量纲后的指标结果 t' , 代入符合数值变化特点的隶属函数便可得到评语等级隶属于模糊集的程度, 即完成式(7)的模糊映射。本文选取等腰三角形隶属函数与 Γ 偏大型隶属函数有肌组合成五评语等级的隶属函数, 具体构成为:

$$r(v_1) = \begin{cases} 1-t'/0.25 & 0 \leq t' < 0.25 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$r(v_k) = \begin{cases} \frac{t'-0.25(k-2)}{0.25} & 0.25(k-2) \leq t' < 0.25(k-1) \\ \frac{0.25k-t'}{0.25} & 0.25(k-1) \leq t' < 0.25k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$r(v_4) = \begin{cases} 0 & t' < 0.5 \\ t'/0.25 - 2 & 0.5 \leq t' < 0.75 \\ e^{-(t'-0.75)/0.25} & t' \geq 0.75 \end{cases} \quad (11)$$

$$r(v_5) = \begin{cases} 1 - e^{-(t'-0.75)/0.25} & t' \geq 0.75 \\ 0 & t' < 0.75 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $k=2, 3$; $r(v_j)$ ($j=1, 2, \dots, 5$) 为评价目标对评语等级 v_j 的隶属度。

需要注意的是, 随着系统负荷的增长, 评估结果可能超过历史指标最大值, 故所定隶属函数的变量范围大于 1, 可保证模糊变换兼容此类情况。

3 直流输电系统检修时机的模糊评判

模糊权重向量 $\tilde{\mathbf{A}} = (a_1, a_2, \dots, a_l)$ 表示各评价指标相对于评价目标的重要程度。将权重向量 $\tilde{\mathbf{A}}$ 与模糊矩阵 $\mathbf{R}$ 通过施加合成算子“ $\circ$ ”可得到模糊结果集 $\tilde{\mathbf{B}}$:

$$\tilde{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{A}} \circ \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_5) \quad (13)$$

其中, $\tilde{\mathbf{B}}$ 为评价目标在评价集 V 上的模糊隶属度。若有 s 个评价目标, 则同理可求得各个评价目标的模糊结果集 $\tilde{\mathbf{B}}_i$ ($i=1, 2, \dots, s$), 根据实际需求选择最大隶属度、最优评价和综合加权等方法得到最终的模糊评判结果。

目前确定权重系数向量 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的方法有 2 种: 一种是通过数据变化的灵敏度来形成一组最能反映数据变化的权重向量, 若某个评价因素的数据变化较大, 则要求的权重将侧重于表达该评价因素的影响, 这在一定程度上偏离了表达评价因素重要性的目的; 另一种是专家评议法, 它是由具有权威性的专家根据工作经验按照实际工程需求来确定的。

本文采用了专家评议法, 根据工程实际需要和专家评定意见, 确定 2 种评判模型的第一层级中 3 个评价指标的模糊权重向量为 $\omega_1 = (0.3, 0.5, 0.2)$ 。第二层级中评价指标的权重根据故障类型的重要程度确定, 对直流输电系统停运的风险影响评估模型为 $\omega_{2,1} = (0.4, 0.3, 0.2, 0.1)$; 对系统运行风险的模型为 $\omega_{2,2} = (0, 0.5, 0.3, 0.2)$ 。以上权重依次对应前文所述的评价指标。

本文采用 $M(\cdot, +)$ 模型的模糊合成算子“ $\circ$ ”, 则具体可表示为:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^3 a_i r_{ij}}{\sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^3 a_i r_{ij}} \quad (14)$$

其中, b_j 为模糊综合评判结果 $\tilde{\mathbf{B}}$ 相对评语等级 v_j 的隶属度; 指标权重有 $\sum_{i=1}^3 a_i = 1$ 。

为量化直流停运对电网可靠性的影响程度及电网运行风险大小, 本文对评语集设定评分值见表 2。

表 2 评语分值设定
Tab.2 Scores of comment

评语等级	电网运行风险	直流停运风险影响
v_1	1	0
v_2	2	0.25
v_3	3	0.50
v_4	4	0.75
v_5	5	1.00

由此可得模糊结果集的量化结果 C :

$$C = \sum_{j=1}^5 b_j v_j \times 100\% \quad (15)$$

根据结果 C , 选择最近的评语作为总评语。当其满足以下判定条件之一时, 可建议直流输电系统检修:

- 电网运行风险的评语结果为风险“非常低”水平, 且直流停运影响满足 $C \leq 40\%$;
- 电网运行风险的评语结果为风险“低”水平, 且直流停运影响满足 $C \leq 30\%$;
- 电网运行风险的评语结果为风险“中”水平, 且直流停运影响满足 $C \leq 20\%$ 。

4 算例分析

4.1 算例参数介绍

以 2011 年南方电网 500 kV 等值网为对象进行算例研究。电网包含天广、高肇、兴安和楚穗 4 回直流, 有发电厂 51 座, 500 kV 线路 357 回, 220 kV 线路 25 回。针对直流停运安排考查的电网故障集合包括: 所有 500 kV 交流线路构成的 $N-1$ 故障集合; 4 回直流相关的并联交流通道及整流、逆变站邻近交流通道故障组合生成的 30 个 $N-2$ 故障组合, 12 个 $N-3$ 故障组合以及 8 个 $N-4$ 故障组合。

现需安排在 2011 年 4 月 1 日对兴安直流进行单极检修,时间为 2 h。首先以 1 h 为单位,得出 24 h 的负荷水平(见图 1)和运行方式。

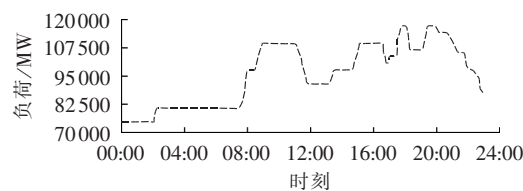


图 1 2011 年 4 月 1 日负荷水平
Fig.1 Load level of April 1st,2011

4.2 算例结果及分析

根据前文提出的模糊评判算法,对以上 24 h 对应的运行方式分别进行计算。下面以 10:00—11:00 时段为例介绍计算过程。

根据式(1)—(12)可得电网运行风险的模糊评判矩阵为:

R= [0.3745 0.1255 0.0017 0.4587 0.0396 ; 0 0.2747 0.7253 0 0 ; 0 0.5000 0.2308 0.2692 0]

结合前文给定的权重向量 ω₁=(0.3,0.5,0.2),由式(13)、(14)可得电网运行风险评判的模糊结果集:

B̃=(0.1124,0.2750,0.4093,0.1914,0.0119)

根据表 2 设定的电网运行风险的评分值,由式(15)可得电网运行风险值 C=2.7155,对应表 2 的评分值可知电网运行风险等级为 v₃,即“中”。

然后评估直流停运对电网可靠性的影响,兴安直流单极停运对电网风险影响的模糊评判矩阵为:

R= [0.1140 0.6181 0.2617 0.0062 0 ; 0.0976 0.9024 0 0 0 ; 0.4121 0.3451 0.2429 0 0]

同理,B̃=(0.1654,0.7057,0.1271,0.0019,0)。

根据表 2 设定的直流停运风险影响的评分值,由式(15)可得兴安直流单极停运对电网风险影响的量化结果 C=24.14%。得到电网运行风险和直流停运影响的模糊评判结果后,根据检修时机判据,可得直流停运检修建议如表 3 所示。

表 3 4 月 1 日 10:00—11:00 直流输电系统停运检修建议
Tab.3 HVDC maintenance proposal for period 10:00—11:00 of April 1st

直流 停运方式	电网 运行风险	直流停运的 风险影响	停运 建议	原因
兴安单极	中	24.14%	不能停运	违背判据 c

同理可得其他 23 个时段的停运建议,结果见表 4。由表 4 可知,停运前风险最大的时段是 20:00—21:00,此时负荷需求处于一天的最高值,线路均处于重载运行状态。可靠性裕度低,系统运行风险为“高”,此时段直流停运的影响较大,影响量化值高达 35%。

表 4 4 月 1 日各时间段直流输电系统停运建议
Tab.4 HVDC maintenance proposal for each period of April 1st

时段	停运前 风险数值	停运前 风险等级	停运后模糊 风险贡献率/%	是否 可停运
00:00—01:00	1.0000	非常低	0	是
01:00—02:00	1.0000	非常低	0	是
02:00—03:00	1.0000	非常低	2.85	是
03:00—04:00	1.0000	非常低	2.85	是
04:00—05:00	1.0000	非常低	2.85	是
05:00—06:00	1.0000	非常低	2.86	是
06:00—07:00	1.0000	非常低	2.85	是
07:00—08:00	1.0000	非常低	4.22	是
08:00—09:00	1.6912	低	13.39	是
09:00—10:00	2.7548	中	23.74	否
10:00—11:00	2.7155	中	24.14	否
11:00—12:00	2.7433	中	23.72	否
12:00—13:00	1.5241	低	11.36	是
13:00—14:00	1.4135	非常低	8.89	是
14:00—15:00	1.5478	低	11.25	是
15:00—16:00	2.6808	中	24.67	否
16:00—17:00	2.7480	中	23.74	否
17:00—18:00	2.7377	中	23.59	否
18:00—19:00	4.1242	高	35.75	否
19:00—20:00	2.7334	中	24.04	否
20:00—21:00	4.1918	高	35.00	否
21:00—22:00	3.1039	中	33.12	否
22:00—23:00	2.4041	低	21.85	是
23:00—24:00	1.5509	低	11.27	是

风险最小的时段为 00:00—02:00,此时直流停运检修对系统可靠性几乎没有可见的影响。而时段 03:00—07:00 内系统整体可靠性水平也非常高,直流检修停运对系统可靠性的影响较低(仅为日峰荷时段影响的 1/10 左右)。

综合定量评估结果可知,4 月 1 日兴安单极停运检修的适宜时段为 00:00—08:00,且该时段安排直流检修的风险非常低。根据这些量化分析结果,调度部门更有把握制定计划检修。本方法同样可用于制定持续时间较长的检修计划,只要适当增大时间窗口的尺度即可。对持续数天、甚至数周的定期检修,可以日最大运行方式、周最大运行方式等单位进行连续时间窗的扫描分析,通过模糊评判得出适宜检修的时间段。

此外,算法目前能较好地适用于直流设备的停电检修,今后通过改进亦可拓展应用在交流线路的计划检修。

5 结论

- a. 模糊综合评判方法简单直观,能满足工程实际应用。通过补充新的运行数据,可不断完善模糊评判中评价因素标准化的精度以及检修时机判据。
- b. 根据研究理论可对电网运行风险进行评语分级,同时量化直流通道停运造成系统运行风险的影

响。因此可分析电力系统的实际运行状态,并且对比各回直流输电系统的影响程度,为电网部门调整运行方式提供参考信息。

c. 由评判结果和检修时机判据可得到直流输电系统停电检修建议。当电网运行风险不高,且直流停运影响低时,可主动安排直流通道停运。理论分析结果可为设备的检修维护工作提供依据,用于优化停电检修时机选择方法。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心. DL/T989—2005 直流输电系统可靠性统计评价规程[S]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [2] 朱建华. 2009—2011 年全国直流系统运行可靠性指标[R]. 北京:电力可靠性管理中心.
- [3] 王遂,任震,蒋金良. 混合法在高压直流输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术,2007,31(12):42-46.
WANG Sui,REN Zhen,JIANG Jinliang. Application of hybrid reliability evaluation method for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology,2007,31(12):42-46.
- [4] 喻新强. 国家电网公司直流输电系统可靠性统计与分析[J]. 电网技术,2009,33(12):1-7.
YU Xinqiang. Statistics and analysis on reliability of HVDC power transmission systems of State Grid Corporation of China [J]. Power System Technology,2009,33(12):1-7.
- [5] 张禄琦,周家启,刘洋,等. 高压直流输电工程可靠性指标统计分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):95-99.
ZHANG Luqi,ZHOU Jiaqi,LIU Yang,et al. Statistical analysis on reliability indices for HVDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(19):95-99.
- [6] 张鹏,刘森,雷兵,等. 一种新的直流输电系统可靠性指标探讨[J]. 电力系统自动化,2011,35(12):85-88.
ZHANG Peng,LIU Sen,LEI Bing,et al. A novel reliability index for HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(12):85-88.
- [7] NIWA M,KATO T,SUZUOKI Y. Life-cycle-cost evaluation of degradation diagnosis for cables[J]. Electrical Insulating Materials, 2005,6(3):737-740.
- [8] 江修波,吴文宣,陈祥伟. 区间分析法在电力变压器全寿命周期成本模型中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):50-53.
JIANG Xiubo,WU Wenxuan,CHEN Xiangwei. Transformer life cycle cost model based on interval analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):50-53.
- [9] LI Wenyuan,KORCZYNSKI J. A reliability-based approach to transmission maintenance planning and its application in BC hydro system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(1):303-308.
- [10] FOUZI H,ABDELKADER Z. Harmony search algorithm optimization for preventive-maintenance-planning for transmission systems[C]//International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications. Zouk Mosbeh, Lebanon:IEEE,2009:584-590.
- [11] 李如琦,唐林权,凌武能,等. 基于云理论和前景理论的变压器状态维修风险决策[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):104-108.
LI Ruqi,TANG Linquan,LING Wuneng,et al. Risk decision-making based on cloud theory and prospect theory for conditional maintenance of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):104-108.
- [12] 丁明,冯永青. 发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):18-23.
DING Ming,FENG Yongqing. Research on the modeling and algorithm to global generator and transmission maintenance[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):18-23.
- [13] 于大洋,韩学山,赵建国. 发电协调检修计划的主从规划模型与分区搜索算法[J]. 电网技术,2010,34(4):88-93.
YU Dayang,HAN Xueshan,ZHAO Jianguo. A bilevel programming model and partition searching algorithm for integrated maintenance scheduling[J]. Power System Technology,2010,34(4):88-93.
- [14] 熊浩,孙才新,张昀,等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):55-60.
XIONG Hao,SUN Caixin,ZHANG Yun,et al. A hierarchical grey evaluation model for operation condition of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(7):55-60.
- [15] 刘从法,罗日成,雷春燕,等. 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):104-107.
LIU Congfa,LUO Richeng,LEI Chunyan,et al. Power transformer condition assessment based on AHP grey fixed-weight clustering[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):104-107.
- [16] 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.
LI Ming,HAN Xueshan,YANG Ming,et al. Basic concept and theoretical study of condition-based maintenance for power-transmission system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(34):43-52.
- [17] CAMCI F. System maintenance scheduling with prognostics information using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Reliability,2009,58(3):539-552.
- [18] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2000:10-37.
- [19] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003:50-70.
- [20] 李文沅. 电力系统风险评估——模型、方法和应用[M]. 北京:科学出版社,2006:79-113.

作者简介:



赖显光

赖显光(1989-),男,广东惠州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划和可靠性、电力系统稳定和控制(E-mail:scut_lyg@126.com);

管霖(1970-),女,湖北孝感人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统规划和可靠性、电力系统稳定和控制、人工智能等(E-mail:lguan@scut.edu.cn);

王滔(1991-),男,湖南永州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划和可靠性(E-mail:scutwt@126.com)。

利用过程免疫时间优化保护的电压暂降缓减方案

李丹丹¹,肖先勇¹,刘 阳¹,李铁牛²,刘旭娜¹

(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;

2. 深圳市海亿达能源科技股份有限公司,广东 深圳 518057)

摘要: 电压暂降对敏感过程的影响与导致暂降的故障电流、清除故障的保护定值以及过程暂降免疫力有关。引入过程免疫时间和用户可接受后果状态的概念,确定用户可接受的暂降持续时间,将过程免疫力分为 3 个等级。研究过程免疫时间与三段式电流保护定值之间的关系,提出通过利用过程免疫时间优化保护缓减电压暂降影响的方案。对 IEEE 14 节点配电系统、某实际含短线路配电系统和 2 种典型敏感过程进行仿真,验证了所提方法的正确性和有效性。结果证明,对于过程免疫时间较长的敏感过程,所提方法可有效缓减由 II 段和 III 段电流保护以及含短线路系统中由带延时的电流保护清除的故障所引起的电压暂降的影响。

关键词: 敏感过程; 电压暂降; 免疫力; 过程免疫时间; 可接受后果状态; 保护; 优化; 缓减措施

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.016

0 引言

电压暂降主要由系统故障等引起,是系统正常运行不可避免的现象,给敏感过程和设备(简称“过程”)造成了巨大影响^[1-3]。低成本缓减电压暂降已成为当前的研究热点。配电网故障是导致暂降的主要原因,暂降深度、持续时间与供配电系统的保护、自动重合闸等装置的定值、配合有关,暂降影响程度还取决于过程免疫力、用户可接受后果状态。因此,研究过程暂降免疫力和用户可接受后果状态,寻找保护与暂降影响程度间的关系,研究电压暂降低成本缓减方案,具有重要理论价值和现实意义。

国内外对电压暂降评估、敏感度、电压耐受能力

及其兼容性等开展了大量研究^[4-6]。暂降评估方法有故障点法^[7]、临界距离法^[8]和暂降域法^[9]等,可评估故障引起的暂降频次,但不能确定暂降持续时间^[10-11]。文献^[12-14]考虑电压耐受能力的不确定性,提出了设备敏感度模糊随机、随机模糊、多重不确定性评估方法,但未深入研究暂降与设备响应事件的映射关系。事实上,电压暂降问题是系统暂降与过程免疫力之间的兼容性问题,因此,研究电压暂降问题应同时考虑系统电压暂降确定因素、过程免疫力和用户可接受后果状态,其中,三者的联系桥梁是关键。

中低压供配电系统主要采用电流保护,保护电流和动作时间定值确定了被保护故障导致的暂降幅值和持续时间^[15-16]。即保护动作时间与暂降持续时间之间存在对应关系,而在给定幅值的电压暂降作用下,过程受影响程度取决于暂降持续时间,与过程免疫时间相对应。因此,保护动作时间与过程免疫时间是判定过程是否会受暂降影响的关键。对于给定供配电系统和给定敏感过程,过程免疫时间是判定

收稿日期:2013-09-17;修回日期:2014-07-24

基金项目:国家教育部博士点基金资助项目(20130181110004);四川省科技支撑计划项目(2013GZ0062)

Project supported by Ph. D Programs Foundation of Ministry of Education of China(20130181110004) and Sichuan Province Science and Technology Support Program(2013GZ0062)

HVDC maintenance timing based on fuzzy comprehensive evaluation

LAI Yuguang¹,GUAN Lin¹,WANG Tao¹,LEI Bing²,ZHANG Man²

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

2. China Southern Grid EHV Power Transmission Company,Guangzhou 510405,China)

Abstract: A method of HVDC system maintenance timing based on fuzzy comprehensive evaluation is proposed. A fuzzy comprehensive evaluation system is built by choosing and improving the power system adequacy evaluation index to obtain the difference of power system risk level between normal and outage operating modes of HVDC system for the further score quantification and comment summary of the fuzzy result set. The HVDC system outage proposal is achieved according to the HVDC channel maintenance criterion. As an example,a daily HVDC maintenance arrangement of China Southern Power Grid is made for a certain day in 2011,which shows that,the proposed method effectively identifies the maintenance timing of HVDC system in daily operating mode and sets suitable outage period.

Key words: fuzzy evaluation; maintenance timing; HVDC power transmission; reliability; assessment; fuzzy theory; risks