

一种定值在线校核顺序的优化方法

张琼¹ 陈召阳²

(1. 国网凉山供电公司 四川 西昌 615000; 2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘要: 电力系统运行方式变化时,保护定值可能不适应当前的运行方式,需要校核部分保护的定值。然而大规模复杂电网中,需要校核的保护非常多,校核工作很难在短时间内完成,导致电网存在校核风险。如果能够辨识出那些误动后对系统影响较大的保护予以优先校核和修改定值,显然能够显著降低电网的校核风险。基于此,在充分考虑保护误动对系统结构和状态造成的影响,提出保护的重要度指标,以保护重要度排序结果决定校核顺序。通过 IEEE 14 节点系统的仿真分析,验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 在线校核; 改进加权介数; 状态脆弱度; 综合脆弱度; 保护重要度

Abstract: When the operating modes of power grid has changed, the protection setting may not be suitable for the present operating mode, therefore, it needs checking some of the protection setting. However, there are many protections needing to be checked in the large and complex power grid, the checking is difficult to be completed in a short time, which results in checking risk for power grid. Therefore, if those protections which have great influence on power system can be identified after the malfunction so as to be checked and adjusted preferentially, it will reduce the checking risk of power system obviously. On this basis, the influence of protection malfunction on the structure and state is taken into account, and the formula of protection importance is put forward in order to decide the checking sequence according to the ranking results of protection importance. At last, the simulation analysis of IEEE 14 bus system proves the feasibility and availability of the proposed method.

Key words: online checking; improved weighted betweenness; state vulnerability; comprehensive vulnerability; protection importance

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0061-05

0 引言

科学技术的不断进步,带动了电力工业的快速发展,电网的电压等级和网络结构的复杂程度逐渐提高,对电网的安全稳定运行提出了严峻的考验^[1-4]。继电保护的定值大都是离线整定的,而高压复杂电网的运行方式复杂多变,使继电保护的定值难以适应当前的运行方式。保护可能出现扰动情况下的误动或者故障情况下的拒动,而这往往是引起大规模停电的罪魁祸首,给国民经济带来巨大的损失。因此,在运行方式变化时需对部分保护定值进行校核,并对不满足校核要求的保护定值进行及时的调整。文献[5-6]从保护定值校核的原理出发,给出了保护定值校核的具体公式;文献[7-9]从结构角度出发,设计了具体的定值校核系统。

然而,大规模复杂电网保护数量巨大,需要校核

的保护较多,用户不可能在短时间内校核完所有的保护,导致电网存在校核风险。由于各保护误动对系统造成的影响程度是不一样的,如果能够找到那些误动后对系统影响较大的保护优先予以校核,并对不满足校核要求的保护优先修改定值,显然能够显著降低电网的校核风险,因而需要一种合理有效的校核顺序优化方法。基于此,充分考虑保护误动对系统结构和状态造成的影响,定义保护的重要度指标,以保护重要度排序结果决定校核顺序,达到优化校核顺序的目的。

1 校核范围的评估

校核范围的评估是校核顺序优化的基础,可避免非校核保护对保护校核顺序的影响,所谓非校核保护指运行方式变化后无需校核的保护,这类保护的定值仍然适应当前的运行方式。电网运行方式发

生变化时,不是所有保护的定值都不适合当前的运行方式。文献[10]表明,电力系统运行方式变化对系统的影响范围局限于一定的区域,保护定值校核范围也理所当然的局限于这一区域。

在线校核过程中最重要的环节就是计算短路电流。若短路电流变化较小,则运行方式变化对定值性能影响较小,该保护定值可予以不校核;若短路电流变化较大,则保护定值受系统运行方式变化影响大,该保护应该纳入校核范围。由于不同保护的定值大小不同,为了方便衡量运行方式变化对不同保护定值影响程度,这里用短路电流变化比来表征定值受影响的大小。将短路电流变化比大于一定阈值的保护纳入校核范围。即

$$R = \{R_i \mid |(I_1(R_i) - I_0(R_i)) / I_0(R_i)| > \varepsilon\} \quad (1)$$

式中 R 为一集合,是保护的校核范围,即需要校核的保护; $i = 1, 2, 3, \dots, n$, $I_1(R_i)$ 为运行方式变化后保护 R_i 的故障点短路电流; $I_0(R_i)$ 为运行方式变化前保护 R_i 的故障点短路电流; ε 为短路电流变化比的阈值,一般取 0.01 ~ 0.05,视具体情况而定。

2 校核顺序的优化

2.1 结构脆弱度指标

文献^[11-12]从介数角度分析元件的结构脆弱性,并得出电力系统在针对高介数元件攻击下会变得很脆弱的结论。所谓介数,又称为节点或支路的负荷,是指某一节点或支路被电源负荷节点对间最短电气路径经过的次数。然而线路或节点在被不同的电源负荷节点对间的最短电气路径经过时,其体现出的功率传输效率是有差异的,同时,潮流并非只是沿着最短电气路径传播,而是沿着所有可能的路径传播。考虑到这些缺陷,基于直流潮流模型中的功率传输分布因子(PTDF)对已有介数进行改进,使其更加符合电力系统的实际情况。

2.1.1 PTDF 定义

在电网络中,电源负荷节点对间存在功率交换,若功率交换量发生变化,则将引起系统中功率的重新分配。PTDF 定义了电源负荷节点对间的功率交换量变化时引起支路功率的变化情况^[13]。

直流潮流模型中,电源负荷节点对 (s, t) 进行功率交换时,设在电源节点 s 注入功率 ΔP_{st} ,在负荷节点 t 汲取功率 ΔP_{st} ,则在支路 ij 上引起的功率变化

量为

$$\Delta P_{st}(ij) = (F_s(ij) - F_t(ij)) \Delta P_{st} \quad (2)$$

式中 $F_s(ij)$ 为在电源节点 s 注入单位功率并在参考节点汲取单位功率时支路 ij 上分布的功率; $F_t(ij)$ 为在负荷节点 t 注入单位功率并在参考节点汲取单位功率时支路 ij 上分布的功率; $\Delta P_{st}(ij)$ 为电源负荷节点对 (s, t) 之间的功率交易量在支路 ij 上引起的功率。进而可以推出如下公式。

$$\Delta P_{st}(ij) = \frac{X_{is} - X_{it} - X_{js} + X_{jt}}{x_{ij}} \Delta P_{st} = G_{st}(ij) \Delta P_{st} \quad (3)$$

式中 X_{is} 为节点电抗矩阵中第 i 行 s 列元素; X_{it} 、 X_{js} 、 X_{jt} 类同; x_{ij} 为支路 ij 的电抗值; $G_{st}(ij)$ 为电源负荷节点对 (s, t) 之间单位功率交换在支路 ij 上引起的功率传输量,即 PTDF。

2.1.2 改进加权介数

根据 PTDF,定义线路的改进加权介数为

$$B(ij) = \sum_{s \in G, t \in L} |G_{st}(ij)| \quad (4)$$

式中 G 为电源节点的集合; L 为负荷节点的集合; $B(ij)$ 为线路 ij 的改进加权介数,其意义为线路对电源负荷节点对功率交换的总效率。 $B(ij)$ 越大,线路功率传输的效率就越高,在电源负荷节点对之间的功率交换过程中就越重要。由于 $B(ij)$ 只与网络参数有关,因而在一定程度上可反应线路的结构脆弱性。

同理,定义节点的改进加权介数为

$$B(i) = \sum_{s \in G, t \in L} G_{st}(i) \quad (5)$$

其中 $B(i)$ 为节点的改进加权介数,其意义为节点 i 对电源负荷节点对功率交换的总效率; $G_{st}(i)$ 为单一电源负荷节点对 (s, t) 单位功率交换时节点 i 上流过的功率, $G_{st}(i)$ 的表达式如式(6)。

$$G_{st}(i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_j |G_{st}(ij)| & i \neq s, t \\ 1 & i = s, t \end{cases} \quad (6)$$

式中 j 为节点 i 的相邻节点。

2.2 状态脆弱度指标

元件状态(指节点或者线路的运行状态)脆弱性是指系统在遭受故障或扰动后,元件状态变量发生变化(如电压下降或呈现下降趋势),并可能向临界值(电压崩溃点)逼近的特性。该特性反映的是从稳定状态向临界失稳状态的过渡过程,是对系统当前状态安全水平及变化趋势的反映。常用如下的数学表达式。

$$\lambda = \frac{|\beta(t) - \beta_{\text{临界}}|}{|\beta_0 - \beta_{\text{临界}}|} \quad (7)$$

式中 $\beta(t)$ 为状态变量的当前值; β_0 为状态变量的初始值; $\beta_{\text{临界}}$ 为状态变量的临界值; λ 为相对脆弱度,能反映不同电压等级状态变量的脆弱程度。

由式(7)可知,节点的状态脆弱度表达式为

$$\lambda(i) = \frac{|u_i(t) - u_{i\text{临界}}|}{|u_{i0} - u_{i\text{临界}}|} \quad (8)$$

式中 $u_i(t)$ 为节点电压的瞬时值; $u_{i\text{临界}}$ 为节点电压的临界值; u_{i0} 为节点电压的初始值; $\lambda(i)$ 反映了节点电压的安全水平, $\lambda(i)$ 越小,则节点发生电压崩溃的可能性就越大。

线路的状态脆弱度表达式可用式(9)表示。

$$\lambda(i, j) = \frac{P_{ij}(t)}{P_{ij\text{max}}} \quad (9)$$

式中 $P_{ij}(t)$ 为线路有功功率的瞬时值; $P_{ij\text{max}}$ 为线路有功功率的最大允许值; $\lambda(i, j)$ 为线路的负载率, $\lambda(i, j)$ 越大,线路被切除的可能性越大。

2.3 保护重要度

衡量元件的脆弱度不能单一地只考虑元件的结构或者状态脆弱度,应该综合考虑两方面的因素,为了克服权重选择的困难性,定义节点的综合脆弱度为

$$C(i) = \frac{B(i)}{\lambda(i)} \quad (10)$$

式中 $C(i)$ 为节点的综合脆弱度,其意义为:对于节点状态脆弱度相同的两个节点,介数较大的节点由于在网络中更加活跃,可以承担的功率传输任务较重,因而该节点电压崩溃对系统的影响程度越深,影响范围越广。

同理,定义线路的综合脆弱度为

$$C(i, j) = B(i, j) \lambda(i, j) \quad (11)$$

式中 $C(i, j)$ 为线路的综合脆弱度,其意义为:对于负载率相同的线路,介数较大的线路由于在网络中更加活跃,可以承担的功率传输任务较重,因而该线路被切除对系统的影响程度越深,影响范围越广。

由于 $C(i)$ 、 $C(i, j)$ 均考虑了元件退出运行的可能性和失效后果,因而一定程度上可将 $C(i)$ 、 $C(i, j)$ 理解为元件的运行风险,因而其意义比较明确。同时,为了满足在线校核的要求,节点和线路的改进加权介数采用运行方式变化前的介数值,而状态值取决于当前运行方式。

显然,保护所属线路的综合脆弱度可以用来表

示保护的重要度,考虑同一线路两端保护所属节点的差异性,定义保护重要度为

$$I(n) = \omega_v C(i) + \omega_l C(i, j) \quad (12)$$

式中 $I(n)$ 为保护 n 的重要度; ω_v 、 ω_l 分别为节点和线路综合脆弱度的权重系数,考虑保护的主要任务是保护线路,因而在评估过程中 ω_l 应该大于 ω_v ,取值视具体情况而定,但两者之和应该为 1。

保护重要度 $I(n)$ 综合考虑了保护所属节点和线路的结构与状态脆弱度,考察对象比较全面, $I(n)$ 越大,保护越重要,扰动以后对系统的综合影响就越大。对校核范围内的保护进行重要度评估并按从高到低排序,以排序结果决定校核顺序,在一定程度上可以优化校核顺序,降低校核过程中电网的运行风险,避免计算机随机顺序校核的盲目性。

3 算例分析

以 IEEE 14(如图 1 所示)节点系统为例,对所提出的方法进行仿真分析,该系统共有 20 条线路,线路均装设方向电流保护,共 40 个保护。

(1) 首先进行校核范围的评估,为了便于验证,以电流 I 段校核为例,电流变化比阈值取 0.05,选择开断线路(B_4 、 B_9)模拟运行方式的变化,评估结果见表 1。

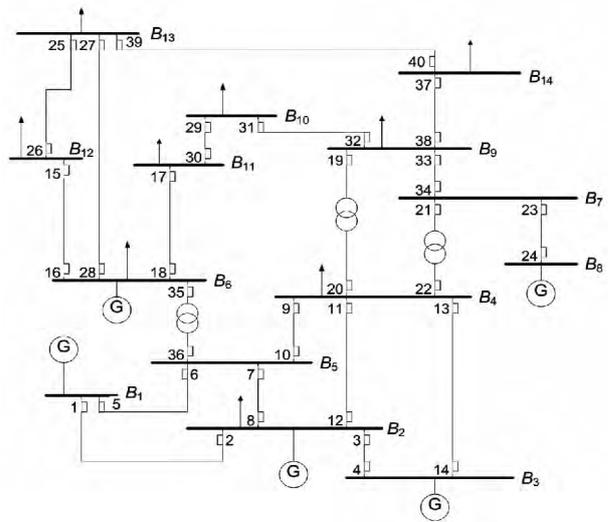


图1 IEEE 14 节点系统

(2) 由式(5)、(6)、(8)求出表 1 中保护所属节点的结构与状态脆弱度,并按式(10)计算出综合脆弱度指标,评估结果如表 2 所示。节点的电压临界值为鞍结分岔值。

表1 校核范围的评估结果

保护编号	短路电流变化比	保护编号	短路电流变化比
15	0.086 2	29	0.082 3
17	0.085 9	33	0.213 7
21	0.143 9	34	0.062 9
22	0.061 8	38	0.070 8
27	0.085 8	40	0.056 6

表2 节点脆弱度评估结果

节点编号	所属保护编号	结构脆弱度	状态脆弱度	综合脆弱度
B_{12}	15	11.511 6	0.887 9	12.964 9
B_{11}	17	14.958 8	0.890 6	16.796 3
B_7	21、34	15.062 6	0.883 5	17.048 8
B_4	22	34.705 2	0.826 4	41.995 6
B_{13}	27	19.114 4	0.906 6	21.083 6
B_{10}	29	16.028 9	0.866 7	18.494 2
B_9	33、38	27.591 7	0.883 2	31.240 6
B_{14}	40	14.041 6	0.828 9	16.940 1

由表2可以看出,节点 B_4 、 B_{14} 的状态脆弱度几乎相同,但节点 B_4 的结构脆弱度较大,在网络中更加活跃,其断开将直接导致两台变压器停止工作,因而节点 B_4 的脆弱度更大,可见考虑结构与状态的综合脆弱度评估指标更加符合实际情况。

(3) 由式(4)、(9)求出表1保护所属线路的结构与状态脆弱度,并按式(11)计算出综合脆弱度指标,评估结果如表3所示,线路有功功率阈值统一取100 MW。

表3 线路脆弱度评估结果

线路编号	所属保护编号	结构脆弱度	状态脆弱度	综合脆弱度
(B_6 , B_{12})	15	5.640 4	0.084 6	0.477 2
(B_6 , B_{11})	17	10.115 7	0.124 6	1.260 4
(B_4 , B_7)	21、22	16.785 8	0.359 4	6.032 8
(B_{12} , B_{13})	27	4.275 6	0.022 8	0.097 5
(B_{10} , B_{11})	29	9.353 8	0.088 2	0.825 1
(B_7 , B_9)	33、34	17.550 7	0.359 4	6.307 7
(B_9 , B_{14})	38	7.812 9	0.061 9	0.483 6
(B_{13} , B_{14})	40	7.116 1	0.088 9	0.632 6

由表3可以看出:线路(B_{10} , B_{11})与线路(B_{13} , B_{14})的状态脆弱度几乎相同,但由于线路(B_{10} , B_{11})

在网络中更加活跃,因而该线路更加脆弱;同理,线路(B_9 , B_{14})的结构脆弱度比线路(B_{13} , B_{14})大,但状态脆弱度比线路(B_{13} , B_{14})小,为了比较两者的脆弱度,显然综合脆弱度更加合适。

(4) 由表2、表3保护所属线路与节点的综合脆弱度评估结果按式(12)计算各保护的重要度,并由高到低顺序排列,评估结果如表4所示, ω_v 取0.1, ω_l 取0.9。

表4 保护重要度

保护	保护重要度	保护	保护重要度
22	9.629 1	17	2.813 9
33	8.557 9	29	2.592 0
34	7.138 8	40	2.263 6
21	7.134 4	27	2.196 1
38	3.559 3	15	1.725 9

由表4可以看出,排名靠前的保护在网络中均处于重要的功率传输通道上,如21、22为变压器支路保护,33、34为线路(B_7 , B_9)的保护,而(B_7 , B_9)为发电机8与变压器支路的重要出线,与实际情况基本相符。保护重要度不仅与所属线路脆弱度有关,还与所属节点的脆弱度密切联系,由于考虑了系统元件的运行状态,因而可用于实时评估。依据保护重要度对校核顺序进行优化,可降低校核过程中的运行风险,避免计算机随机顺序校核的盲目性。同时,也可以依据保护重要度排序结果对不满足校核要求的保护进行定制修改,为调度部门工作人员制定合理的定值维护策略提供依据。

4 结 论

为了使继电保护校核顺序更加合理科学,减小校核过程中的运行风险。所以对校核范围内的保护进行重要度评估并排序,以排序结果决定校核顺序,在一定程度上可降低电力系统的运行风险。因而所提的校核方案对在线校核具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 孟绍良,吴军基,王虎.电网脆弱性评价的灵敏度分析法[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(5):89-93.
- [2] 曹一家,刘美君,丁理杰,等.大电网安全性评估的系统复杂性理论研究[J].电力系统及其自动化学报,

2007, 19(1): 1-8.

[3] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.

[4] 张晓辉, 李颖, 卢志刚. 风险思想下的输电线路脆弱性综合分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 35-40.

[5] 黄超, 李银红, 等. 基于整定逆过程的保护定值在线校核[J]. 电力系统及其自动化, 2011, 35(12): 59-64.

[6] 曾耿晖, 李银红, 段献忠. 电力系统继电保护定值的在线校核[J]. 继电器, 2002, 30(1): 22-24.

[7] 吕颖, 张伯明. 基于集群计算机的保护定值在线校核[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 12-16.

[8] 谢俊, 石东源, 杨增力, 等. 基于多代理系统的继电保护定值在线校核预警系统[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 77-82.

[9] 朱永利, 宋少群, 朱国强, 等. 地区电网保护定值在线校验

智能系统[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 87-92.

[10] 曹国臣, 蔡伟国, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 5-56.

[11] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权系数指标的电网脆弱线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2001, 39(23): 89-92.

[12] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.

[13] 华科, 谢开, 郭志忠. 采用直流和交流功率传输分布因子的输电权交易[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 71-74.

作者简介:

张琼(1981), 女, 助理工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

陈召阳(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2013-06-19)



(上接第12页)

模与仿真[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28(9): 1069-1072.

[7] Tamotsu Ninomiya, Akira Takeuchi. Analysis of Beat Phenomenon and Chaotic Oscillation in Resonant Switching Converters[J]. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1991(1): 417-422.

[8] Nagy I., Denes I., Hamar J., et al. Small-signal Analysis of a Dual Channel Resonant Buck and Boost Converter[C]. Industrial Electronics, 2002, ISIE 2002, Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on 2002, (4): 1279-1284.

[9] 李炜, 朱新坚, 曹广益. 基于一种改进的BP神经网络光伏电池建模[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 228-290.

[10] 郭亮, 陈维荣, 贾俊波, 等. 基于粒子群算法的BP神经网络光伏电池建模[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(2): 84-87.

[11] 张艳霞, 赵杰. 基于反馈型神经网络的光伏系统发电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 96-101.

[12] 栗然, 李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测[J]. 中国电力, 2008, 41(2): 74-77.

作者简介:

杨青斌(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源及其并网技术;

袁铁江(1975), 男, 博士, 副教授, 从事洁净能源发电及其并网技术等方面的研究工作。

(收稿日期: 2013-07-23)

4 结 论

提出了以传统反传播神经网络作为建模基础, 建立光伏系统出力初步预测模型, 再利用历史出力波动量统计规律对其初步预测结果进行修正建立预测模型, 对未来短期内相应时刻的光伏系统出力进行预测。算例结果说明, 该预测模型显著提高了预测精度, 较好地模拟了现场光伏系统的实际情况, 为从预测太阳辐照强度、温度到预测功率提供了一种良好的方法。对于研究大规模光伏系统出力预测具有一定的应用价值。

参考文献

[1] 李乃永, 梁军, 赵义术. 并网光伏电站的动态建模与稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 12-18.

[2] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模及仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 83-87.

[3] 郭立, 晁勤, 袁铁江, 等. 基于工程模型的光伏建模与输出特性仿真[J]. 四川电力技术, 2011, 34(5): 89-91.

[4] 张艳霞, 赵杰, 邓中原. 太阳能光伏发电并网系统的建模和仿真[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3097-3012.

[5] 戴武昌, 孔令国, 崔柱. 大规模光伏并网发电系统建模与运行分析[J]. 中国电力, 2012, 45(2): 58-63.

[6] 茆美琴, 苏建徽, 张国荣, 等. 大型光伏并网系统的建