

地区电网输电安全水平在线评估算法与系统设计

刘若溪¹, 张建华¹, 苏玲¹, 潘俊²

- (1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 江苏镇江供电公司, 江苏省 镇江市 212002)

An On-Line Assessment Algorithm of Transmission Security Level for Regional Power Grid and Its Design

LIU Ruoxi¹, ZHANG Jianhua¹, SU Ling¹, PAN Jun²

- (1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China;
2. Jiangsu Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212002, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Along with the unceasing and rapid development of urbanization in China, more and more attentions are paid to the transmission security of regional power grid, and one of the most critical issues is the on-line assessment of transmission security level. A mathematical model related to the on-line assessment of transmission security level of regional power grid is proposed, and on this basis a corresponding strategy is built and the repetitive power flow analysis is utilized to assess the transmission security level of regional power grid under current operation mode. Regarding the presented strategy as the core, an approach, in which the real-time database is combined with relational database, is adopted to design the hardware structure and software architecture of the on-line transmission security level assessment system for regional power grid, and the mode of data transmission is described. Finally, utilizing above-mentioned strategy and approach, an on-line assessment system for a certain prefecture-level city is set up, and the proposed methods are verified by on-line data. Verification results show that the proposed model and assessment strategy are feasible.

KEY WORDS: regional power grids; security; online assessment; total transfer capability; real-time transmission security index

摘要: 随着中国城市化进程的不断推进,越来越多的有关地区电网输电安全性的问题被人们关注,其中输电安全水平的在线评估就是其中之一。提出了地区电网输电安全水平在线评估的相关数学模型,并在此基础上建立了相应的评估策略,采用重复潮流法对地区电网当前运行方式下的输

电安全水平进行了评估。以上述方法为核心,应用实时数据库与关系数据库相结合的方法设计了地区电网输电安全水平在线评估系统的硬件网络结构与软件架构,并对数据传输方式作了描述。最后按照文中所述方法在某地级市尝试搭建了该在线评估系统,并利用在线数据对所提方法进行了验证,结果证明所提模型与评估策略的可行性。

关键词: 地区电网; 安全性; 在线评估; 最大输电能力; 实时输电安全系数

0 引言

随着我国城市化进程的不断推进,国家对地区电网建设性资金的投入逐年增加,由此使得地区电网的发展速度有很大提高。在地区电网高速发展的过程中,人们最为关注的就是如何保障地区电网的安全可靠运行。为达到这一目地,调度运行人员不仅需要在电网正常运行时获得有关电网安全方面的各类信息,而且更需要在故障状态下实时评估电网的输电安全水平,了解负荷波动、各类人为操作和自动装置动作特性对电网安全的影响。因此,只有在充分了解电网安全水平的前提下,才能在安全等级偏低时提前采取控制措施,避免事故的发生,提高控制的主动性^[1-3]。

文献[4-6]研究了输电网中线路的输电安全水平计算方法以及不同电网参数对计算结果的影响;文献[7-10]对配电网的供电安全性进行了研究,但结果多为定性评估;文献[11-13]尝试将重复潮流法引入到输电网和配电网的可用输电能力研究中,取得了不错的效果。但上述研究没有涉及如何实现其系统设计,也并没有将此方法应用于地区电网并给

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877026)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50877026).

出合理的评估策略。地区电网主要管辖由一定量 220 kV、大量 110 kV 和 35 kV 等电压等级构成的子输电系统,其中既包括输电网的低压部分,也包括配电网的高压部分,属于输电与用电之间的重要联络环节,全面考虑其正常运行的各种约束条件,科学、准确地实时计算其当前运行方式下的输电安全水平并将其与电网智能调度系统相结合,将对整个电网的优化运行与控制、对地区电网调度自动化系统各项功能的实现具有重要价值。

基于上述考虑,本文提出地区电网输电安全水平在线评估的相关数学模型,并在此基础上建立相应的评估策略,采用重复潮流法对地区电网当前运行方式下的输电安全水平进行了评估。以实时数据库与关系数据库相结合的方法为基础,设计地区输电安全水平在线评估系统的硬件与软件架构,其中软件架构包括数据层、服务层、应用层和展示层 4 个主要层次,并对数据传输过程作了描述。最后按照本文所述系统设计方式在某地级市尝试搭建了该在线评估系统,并利用在线数据对本文所提方法进行验证。

1 评估模型的建立

1.1 地区电网最大输电能力

地区电网最大输电能力是指评估地区电网在指定运行方式下,满足所有母线节点电压约束以及所有支路功率约束的条件时,能传输的最大功率。它由地区电网的运行方式和负荷增长模式共同决定。对于地区电网而言,限制其输送容量的因素主要有热稳定极限和电压稳定极限^[2],很少涉及有功功率稳定极限。因此对于线路本文取其导线热极限决定的最大传输功率为其传输功率上限;对于变压器,则取其额定功率作为传输功率上限,并假定上级电网能提供充足的电量,负荷增长模式为评估区域内的负荷以相同功率因数按比例增长。

1.2 地区电网最大输电能力在线评估的数学模型

根据以上叙述,地区电网最大输电能力的数学表达式为

$$S_{\max} = \sum_{i \in Q} (S_{bi} + mS_{ui}) \quad (1)$$

式中: S_{\max} 为评估地区电网所能传输的最大功率;即地区电网的最大输电能力; S_{bi} 为节点 i 的当前实际负荷; Q 代表整个地区电网(当对地区电网中的一个区域进行评估时, Q 退化为相应区域电网,当对地区电网中的一个节点或一条支路的输电能力进

行评估时, Q 仅指这个节点或支路),所以目标函数括号中的第 1 项即为当前评估区域内实际负荷之和; m 为一实数,在 $S_{ui}=S_{bi}$ 前提下代表负荷增长倍数; S_{ui} 为节点 i 的负荷增长步长,本文取 $S_{ui}=S_{bi}$ 。

约束条件包括潮流约束、节点电压约束以及导线和变压器支路的容量约束,即

$$YU = I \quad (2)$$

$$V_{il} \leq V_i \leq V_{iu} \quad (3)$$

$$i_i \leq i_{i\max} \quad (4)$$

$$S_i \leq S_{i\max} \quad (5)$$

式中: Y 为节点导纳矩阵; U 为节点电压向量; I 为所有节点的复电流注入向量; V_i 、 V_{iu} 和 V_{il} 分别为节点 i 的电压及其上下限; i_i 和 $i_{i\max}$ 为各支路流过的电流和其允许通过的最大电流; S_i 和 $S_{i\max}$ 为各变压器支路流出的功率值和最大允许容量。

1.3 基于最大输电能力的地区电网输电安全水平在线评估策略

根据 1.2 节的分析,本文定义地区电网评估区域的实时输电安全系数为

$$T = \frac{S_{\max}}{\sum_{i \in Q} S_{bi}} \quad (6)$$

式(6)的分子为评估区域最大可用传输容量,分母为评估区域当前实际负荷量。由此可见,评估区域实时输电安全系数 T 的大小由 2 部分决定:一是区域最大可用传输容量,二是当前实际负荷水平。两者分别表征生产实际中的 2 个不同方面。 S_{\max} 主要反映网架结构及运行方式给 T 带来的影响,当运行方式发生变化时, S_{\max} 的大小也要相应发生改变。

$\sum_{i \in Q} S_{bi}$ 主要反映实际系统中负荷随时间变化所带来的影响。考虑实时在线计算,不同的时间点对应的 $\sum_{i \in Q} S_{bi}$ 值也不同,因此也对应着不同的 T 值。

从式(6)不难看出 T 是一个大于 1 的量,因此本文根据 T 的大小,将地区电网的安全水平分为 I、II 和 III 3 个等级,3 个等级之间由 2 个阈值加以区分,分别是 T_1 和 T_2 ,且 $T_2 > T_1$ 。 $T \geq T_2$ 时,地区电网的安全运行水平处在 I 等级,其安全水平相对较高; $T_1 \leq T < T_2$ 时,地区电网的安全运行水平处于 II 等级,其安全水平处于中等; $T < T_1$ 时,地区电网的安全运行水平处于 III 等级,其安全水平较低。

2 地区电网输电能力在线评估算法

对地区电网的输电能力进行评估,即求取输电

安全系数 T ，必须首先求 S_{max} 。 S_{max} 的求解实质上是在给定的运行方式及负荷增长模式下求取一临界点的问题，在该临界点恰好有一约束起作用，当负荷有一微小增长，继续增加负荷时将有越限发生，该临界点对应着评估区域的最大输电能力。本文采用重复潮流法^[5-7]求取临界点，因为在线应用对于速度的要求很高，重复潮流法简单、快速，非常适合在线应用。

利用重复潮流计算 S_{max} 的思路为：从当前的运行点出发，选取一个合适的步长 h ，按照一定的负荷增长模式(本文按相同功率因数等比例增长)，不断增大负荷，每增加一次负荷就求取一次潮流解，直到有越限约束条件被激发为止。在负荷增长过程中，步长 h 按一定策略不断调整，直到满足一定的精度要求。即将发生越限的临界点所对应的负荷作为地区电网当前运行方式所能传输的最大负荷。

在求解过程中，步长 h 的选择对在线计算的速度有很大影响，如果步长选择过大，计算精度就会降低，如果步长过小，则收敛速度又会太慢。考虑这一原因，本文采用自动变步长的方法逐步向前增加负荷大小：若增加负荷成功(即没有约束条件触发)，则以原步长继续增加负荷；若增加负荷失败(触发了约束条件)，则步长减半，如此反复，直到步长减小到满足精度要求为止。

图 1 为基于自动变步长重复潮流法求取最大传输功率 S_{max} 的原理。图 1 中弧线与坐标轴所包围部分为地区电网可正常输送的功率示意区，当前的负荷水平为 S_0 ，以原负荷为增长基数不断增加负荷，直到触发越限条件为止，然后缩小步长，最终收敛在边界点 S_6 。

图 2 为应用变步长重复潮流法求取 S_{max} 和 T 的程序流程。图 2 中： m_0 为初始步长，本文选为 1； ϵ 为收敛精度，本文取 $\epsilon=10^{-3}$ 。

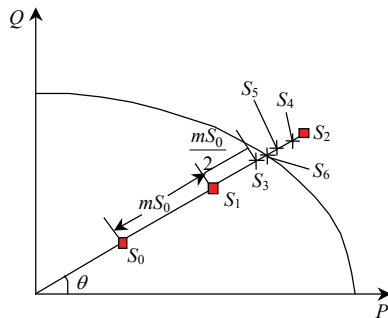


图 1 重复潮流法求取 S_{max} 原理
Fig. 1 Diagram of getting the S_{max} using repetitive power flow

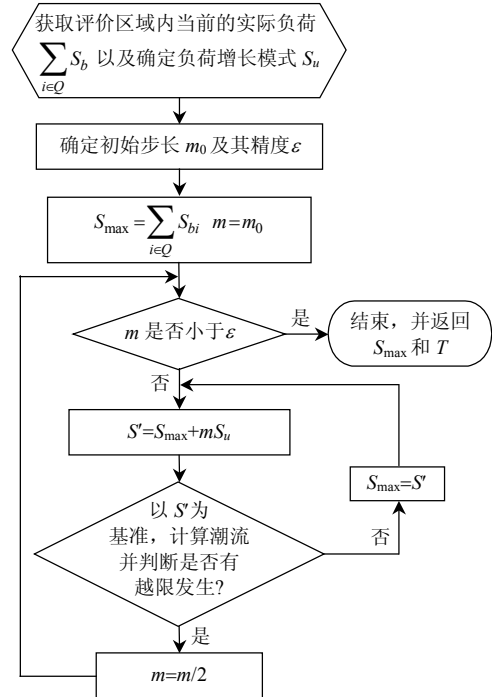


图 2 求取 S_{max} 和 T 的程序流程

Fig. 2 Flow chart of how to get the S_{max} and T

3 地区电网输电能力在线评估系统关键技术

3.1 系统硬件网络结构设计

本文设计的系统已经在某市调度中心试应用，其具体结构如图 3 所示。接口站、关系型数据库服务器^[15-16]、实时数据服务器、以及应用服务器组成了系统的整体框架；接口服务器负责从 EMS 的 Web 服务器上接收 SCADA 实时数据、CIM/XML 文件等信息，并将转换过的数据分别存储在关系数据库服务器和实时服务器中；关系数据库服务器用于存储电网模型、设备参数、设备状态等信息；实时数据库服务器用于存储从 EMS 采集的实时数据；应用服

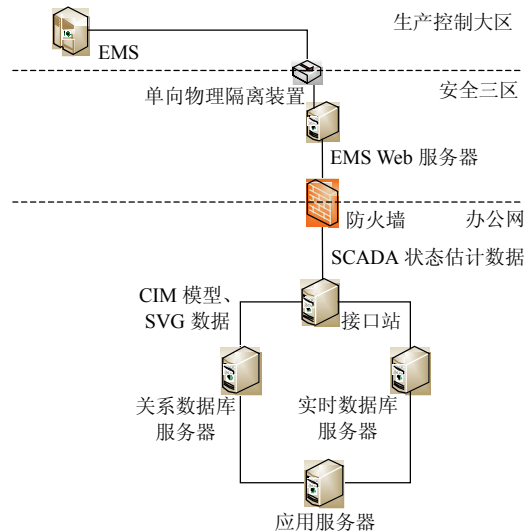


图 3 系统网络结构

Fig. 3 Diagram of system network architecture

务器用来完成在线拓扑分析、潮流分析、最大输电能力计算等服务,并完成系统的 Web 发布^[17-18]。

3.2 系统软件架构设计

系统软件架构分为数据层、基础层、应用层和展示层 4 个主要部分。各层次具体功能如图 4 所示。

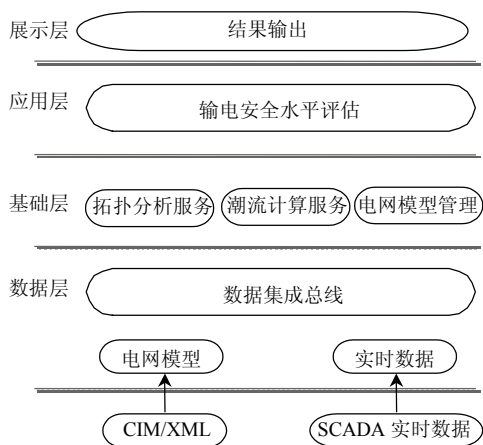


图 4 系统软件架构

Fig. 4 Diagram of software architecture

数据层主要负责对不同来源的数据按照标准接口进行数据采集、标准转换,其中从地市供电公司 EMS 中可获得电网运行实时数据,从生产管理系统中可获得设备状态检修数据。在本系统的设计中使用了双数据库结构,即 PI 实时数据库与 ORACLE 关系数据库相结合的方式。系统所需的电网运行实时数据存入 PI 实时数据库中,电网模型数据和计算分析结果存入 ORACLE 数据库中。基础层包括拓扑分析服务、潮流计算服务和电网模型管理服务 3 个部分。拓扑分析主要用来对当前运行状态下的电网进行网络结构描述,本系统采用文献[19]中所述方法。相比文献[20-21]所述方法,该方法仅需设备端口节点号,并且可以对任何接线方式下多电压等级的网络进行拓扑,非常适合在线应用。为了提高收敛性,潮流计算服务为应用层提供必要的基础分析数据,主要包括支路传输功率以及节点电压。其首先采用 P-Q 分解法进行初始迭代,然后再转入牛顿-拉夫逊法。电网模型管理的主要任务则是将基于 CIM/XML 的电网模型解析,转换成从区域到站,再到设备,最后到用户,具有鲜明层次性的易于读懂的电网模型,使电网设备所属关系和拓扑连接关系更加直观明晰。应用层是系统的核心,用来完成地区电网输电安全水平的在线评估,其核心算法如第 3 小节所述。展示层则负责将应用层的计算结果以图形和文本的形式展现给用户,采用 Flex 技术实现实时数据在 Web 上的发布和图形化

显示,用户在网页上浏览实时变化的厂站接线图、潮流图以及计算结果。

考虑到系统的标准化和开放性,本文设计的系统从体系结构、数据模型到系统接口均遵循 IEC61970 标准^[22-24],保证了其后续开发的可能性。

3.3 数据的采集和传输

系统计算采用的是状态估计后的电网数据,地市调度系统的 PAS 数据每 5 s 刷新一次,其数据截面保存在 EMS 服务器的数据库中,地市的 EMS 服务器数据库通过单向网络隔离装置与安全 3 区上的 Web 发布服务器上数据库的数据同步,从此服务器可得到与 EMS 服务器上一致的数据。通过南瑞 OPEN-3000 提供的数据标准化导出,可在本地得到一个基于 XML 或 E 语言的数据副本,导出的 PAS 数据副本可通过 FTP 传输,由三区办公网络把数据截面发送至数据解析服务器。SCADA 数据则是通过 CORBA 体系直接从 EMS 中被获取过来,存入 PI 实时数据库中。

3.4 数据的解析与导入

OPEN-3000 导出的基于 CIM/XML 和 E 语言的数据截面包含地市电网的网络拓扑结构和实时运行数据等信息,但这些信息不能被 PI 实时数据库存储,所以需要作为数据载体的 XML 文档(CIM/XML 形式)和 DT 文档(E 语言形式)进行解析,从而得到电网的网络拓扑结构和实时运行数据等信息。对于网络拓扑结构数据,通过解析可获得具体的元数据信息,同时基于 CIM 模型设计静态数据库,按照元数据与具体数据库的映射关系,找到实例数据项,并将实例数据信息存入静态模型数据库中,同样通过解析后得到的实时运行数据则存入 PI 实时数据库。通过唯一的设备 ID 使 ORACLE 数据库中的电网模型数据与 PI 实时数据库中的实时数据进行对应、融合,从而得到计算所需的完整数据。

4 算例分析

本文在仿真过程中,取 $T_1=1.2$, $T_1=1.8$ (T_1 和 T_2 的取值可根据不同地区的实际情况自行设定)。当 $T \geq 1.8$ 时,认为评估区域内的电网安全裕度较高,即评估区域内负荷按比例增加 80% 后,电网仍可正常运行而不会有越限情况发生;当 $1.2 \leq T < 1.8$, 也认为评估区域内的安全裕度满足要求,运行状态处于中等安全水平,暂不需要采取预防控制措施;当 $T < 1.2$ 时,则认为评估区域的安全裕度较低,如果当前负荷波动较大,有可能使某些设备发生越限,

因此处于该运行状态的电网应尽快采取调整措施，提高输电裕度，从而改善安全等级。

算例结构如图 5 所示。仿真系统为河南北部某地区电网的一部分。包括 3 座 220kV 变电站，9 座 110kV 变电站，21 条线路，6 台三绕组变压器和 17 台双绕组变压器。3 座 220kV 变电站之间由 220kV 联络线相连，与该地区其他 220kV 变电站形成环网运行，其 110kV 侧虽有联络线相连，但正常运行时为避免电磁环网而各自独立运行，图 5 中未画出这 3 座变电站 110kV 母线上的联络线。

由图 5 可以看出，此部分电网为一包括 220kV、110kV 和 10kV 的多电压等级的典型地区输电网络。可将其分为 3 个输电区域(不包括 220kV 变电站)，其中没有参与运行的 T 接线不属于任何区域。详细分区见表 1。

表 1 各区域所含元件详细信息

Tab.1 Description for every detail of each area

区域	线路	变压器	总计
区域 I	1、2、3、4、5、	峨眉 1#、峨眉 2#、	11 条线路
	6、7、8、9、10、11	刘家庄 1#、刘家庄 2#、 滨河 1#、南郊 1#、 中心 1#、中心 2#、东风 1#	9 台变压器
区域 II	12、13、14、15、16	东风 2#、司空 1#、 滨河 2#、西郊 1#、西郊 2#	5 条线路 5 台变压器
区域 III	17、18、19	南郊 2#、北郊 1#、司空 2#	3 条线路 3 台变压器

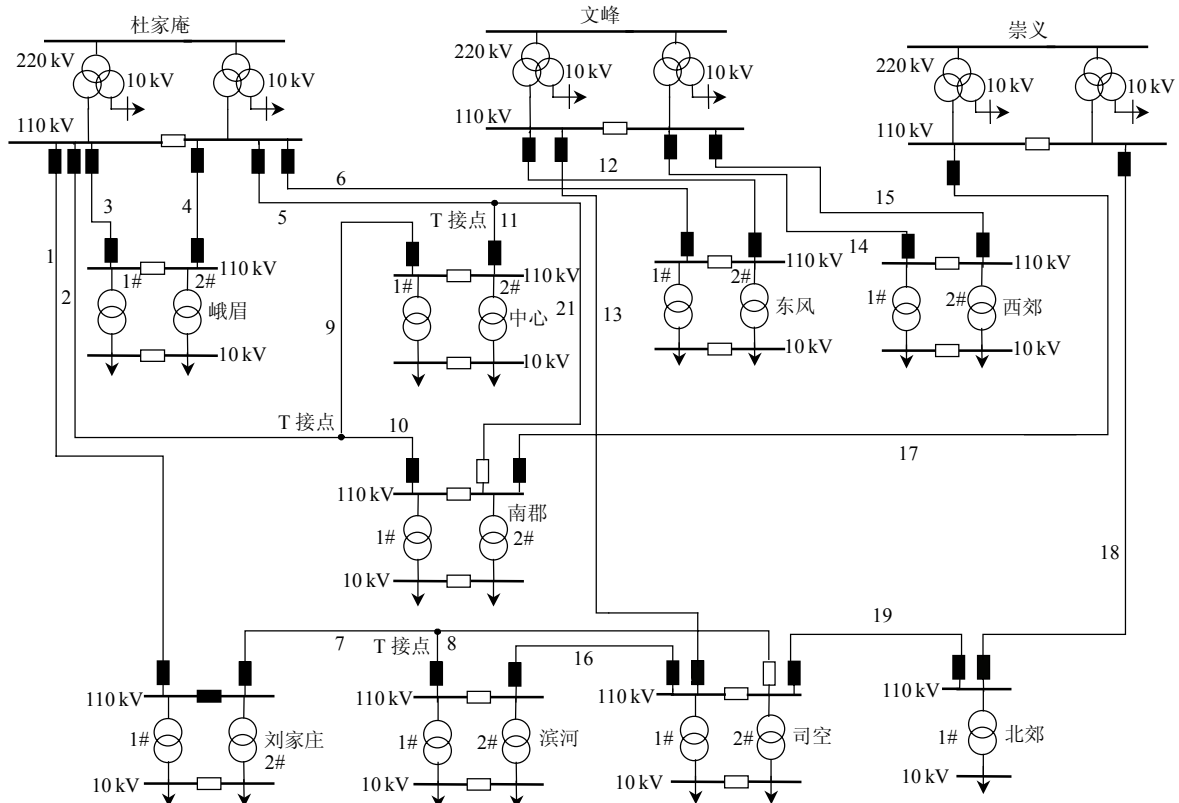


图 5 仿真系统

Fig. 5 Simulation system

区域 I、区域 II 和区域 III 所带负荷分别为 92.78 MW+23.26 Mvar、43.51 MW+27.01 Mvar 和 59.07 MW+25.34 Mvar。假设 110kV 和 10kV 母线允许电压范围为 1±5%。

案例 1：分别对 3 个输电区域的输电安全进行评估，结果见表 2。由表 2 可见，3 个区域分别处于不同的输电安全等级：等级最高的是区域 II，其输电安全系数 T 为 2.1860，相应的输电安全等级为 I 级，说明其现在的运行状态很安全；其次是区域 III，它的输电安全系数 T 为 1.2734，相应的输电安全等级为 II 级，也认为它是比较安全的，最后是区域 I，它的输电安全系数 T 为 1.1637，对应输电安全等级为 III，说明其现在的运行条件下安全级别很低，处在不安全的状态下，需要及时采取调整措施增加它的输电裕度。 T 的大小直接反映评估区域可承受负荷波动的能力， T 越大这种能力越大，由此可见，区域 II 承受负荷波动的能力最大。从表 2 中还可以看出， T 的大小和剩余输电容量没有直接关系，有时 T 很大，但是其剩余输电容量却很小，这是由于 T 的大小不但由 S_{max} 决定，还和评估区域的初始负荷有关。

案例 2： S_{max} 不仅可用于计算评估区域的输电安全水平，还可以用来指导某些为转供负荷而进行

表 2 各区域输电安全评估详细结果
Tab. 2 The detail result of assessment for transmission safety of each area

初始负荷		S_{max}		剩余输电容量		T	输电安全水平	达到收敛条件时起作用的约束条件
有功/MW	无功/Mvar	有功/MW	无功/Mvar	有功/MW	无功/Mvar			
92.78	23.26	107.28	29.68	14.50	6.42	1.163 7	III	中心 1 号 10kV 侧母线电压越下限
43.51	27.01	95.85	57.82	52.34	30.81	2.186 0	I	西郊 2 号功率越限
59.07	25.34	75.22	32.27	16.15	6.93	1.273 4	II	南郊站 2 号功率越限

的开关操作。由图 5 可见，东风站 2 台变压器上游电源分别来自杜家庵站与文峰站。假设线路 6 发生故障退出运行，则需将该线路两端断路器断开，将故障线路隔离。该线路所传输的东风 1 号变上功率可通过闭合东风站 110 kV 侧母联开关，由区域 II 中线路 12 输送。此时需要对区域 II 中线路 12 的输电能力进行实时评估，从而决定是否能够进行闭合母联开关的操作。

对线路 12 的最大可用输电能力 S_{max} 计算的详细过程如表 3 所示。由表 3 可看出，线路 12 的最大可用输电能力 S_{max} 为 40.49 MW+77.38 Mvar。剩余输电能力为 35.31 MW+67.48 Mvar，原有线路 6 上所传输的功率为 18.88 MW+8.11 Mvar，可完全转供线路 6 所传输的功率，即不需要切除东风 2 号所传输的功率，而只需闭合东风站 110kV 母联开关恢复全部负荷的供电。计算过程共迭代了 21 次，直

到步长精度小于 $\varepsilon=10^{-3}$ 为止。

由表 3 还可以看出，初始步长的选取对迭代次数有很大影响，由于地区输电网的最大传输能力不会超过实际负荷很多倍，因此初始步长选择 S_0 时，迭代不超过 5 次就会有越限条件被触发。在算法的整个迭代过程中，潮流计算的次数一般不会超过 20 次，计算量不是很大，非常适合在线应用。

5 结束语

由于地区电网包含的电压等级较多，接线方式灵活多变，急需一种能够在线准确评估电网当前运行状态安全水平的方法。为此，本文提出了地区电网输电安全水平在线评估的相关数学模型，并在此基础上建立了相应的评估策略，并将重复潮流法引入到地区电网输电安全水平在线评估中。基于上述模型和算法设计了地区电网输电安全水平在线评估系统。最后按照本文所述方法在某地级市尝试搭建了该在线评估系统，其不仅能真实反映评估区域的输电安全水平，还可为负荷转供操作提供辅助决策。希望本文的内容能为将来同类问题的进一步研究提供一些有益的思路。

致 谢

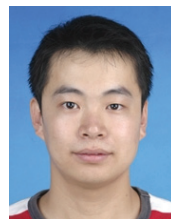
本文所做的工作是在河南省电力试验研究院的大力支持下完成的，在此表示衷心的感谢。

表 3 计算线路 12 S_{max} 的详细过程
Tab. 3 Every detail of how to get the S_{max} of line 12

项目	初始负荷值 S_0	第 1 次迭代	第 2 次迭代	第 3 次迭代	第 4 次迭代	第 5 次迭代
有功/MW	5.18	10.36	15.54	20.72	25.90	31.08
无功/Mvar	9.90	19.80	29.70	39.6	49.50	59.4
触发的约束条件	无	无	无	无	无	无
步长	0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
项目	第 6 次迭代	第 7 次迭代	第 8 次迭代	第 9 次迭代	第 10 次迭代	第 11 次迭代
有功/MW	36.26	41.44	38.85	41.44	40.15	41.44
无功/Mvar	69.30	79.20	74.25	79.20	76.73	79.20
触发的约束条件	无	东风 2 号 110kV 母线电压越限	无	东风 2 号 110kV 母线电压越限	无	东风 2 号 110kV 母线电压越限
步长	S_0	S_0	$S_0/2$	$S_0/2$	$S_0/4$	$S_0/4$
项目	第 12 次迭代	第 13 次迭代	第 14 次迭代	第 15 次迭代	第 16 次迭代	第 17 次迭代
有功/MW	40.79	41.12	40.31	40.47	40.63	40.55
无功/Mvar	77.96	78.58	77.03	77.34	77.65	77.50
触发的约束条件	东风 2 号 110kV 母线电压越限	东风 2 号 110kV 母线电压越限	无	东风 2 号 110kV 母线电压越限	东风 2 号 110kV 母线电压越限	东风 2 号 110kV 母线电压越限
步长	$S_0/8$	$S_0/16$	$S_0/32$	$S_0/32$	$S_0/32$	$S_0/64$
项目	第 18 次迭代	第 19 次迭代	第 20 次迭代	第 21 次迭代		
有功/MW	40.51	40.49	40.51	40.50		
无功/Mvar	77.42	77.38	77.42	77.40		
触发的约束条件	东风 2 号 110kV 母线电压越限	无	东风 2 号 110kV 母线电压越限	东风 2 号 110kV 母线电压越限		
步长	$S_0/128$	$S_0/256$	$S_0/256$	$S_0/512$		

参考文献

- [1] 薛禹胜. 时空协调的大停电预防框架(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8-16.
Xue Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts Part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16(in Chinese).
- [2] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 8-10.
Xue Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts Part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 8-10(in Chinese).
- [3] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 1-11.
Xue Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts Part III optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-11(in Chinese).
- [4] 郑华, 刘伟, 张粒子, 等. 基于改进人工鱼群算法的电网可用输电能力计算[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 84-88.
Zheng Hua, Liu Wei, Zhang Lizi, et al. Available transfer capability calculation based on modified artificial fish school algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 84-88(in Chinese).
- [5] Greene S, Dobson I, Alvarado F L. Sensitivity of transfer capability margins with a fast formula[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1): 34-40.
- [6] 韩学山, 李晓波. 考虑元件长期载荷容许条件的最大可用输电能力的使用计算方法[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 10-15.
Han Xueshan, Li Xiaobo. Practical calculation method of maximal available transfer capability considering long-term load permissible condition of power transmission components[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 10-15(in Chinese).
- [7] 能源电[1993]228号城市电力网规划设计导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 北京.
- [8] 李欣然, 李培强, 朱湘有, 等. 基于最优化原理的高压配电网建设规模评估[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 46-50.
Li Xinran, Li Peiqiang, Zhu Xiangyou, et al. Evaluation construction size of district high voltage distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 46-50(in Chinese).
- [9] 王伟, 张粒子, 麻秀范. 基于结构元理论的重压配电网接线模式[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 35-40.
Wang Wei, Zhang Lizi, Ma Xiufan. Connection modes in medium-voltage distribution systems based on configuration-unit theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 35-40(in Chinese).
- [10] 张建波, 罗滇生, 姚建刚, 等. 基于经济性分析的城网变电容载比取值方法研究[J]. 继电器, 2007, 35(13): 39-43.
Zhang Jianbo, Luo Diansheng, Yao Jiangan, et al. Research on value of capacity-load ratio in urban power network planning based on the economical analysis[J]. Relay, 2007, 35(13): 39-43(in Chinese).
- [11] 李振坤, 陈星莺, 刘皓明, 等. 配电网供电能力的实时评估分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 36-39.
Li Zhenkun, Chen Xingying, Liu Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 36-39(in Chinese).
- [12] Ou Yan, Singh C. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Trans on Power System, 2002, 17(2): 467-468.
- [13] Gravener M H, Nwankpa C. Available transfer capability and first order sensitivity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 512-518.
- [14] 刘皓明, 倪以信, 吴军基, 等. 计算电网可用输电能力的方法评述[J]. 继电器, 2003, 31(10): 45-50.
Liu Haoming, Ni Yixin, Wu Junji, et al. Review of available transfer capability calculation in electricity market[J]. Relay, 2003, 31(10): 45-50(in Chinese).
- [15] 花蕊, 秦红星, 刘斌. 基于关系型数据库的变电站两票专家系统[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 85-89.
Hua Rui, Qin Hongxing, Liu Bin. Expert system for substation working arrangement & switching sequence by using a relational database[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 85-89(in Chinese).
- [16] 张艳, 翟学明, 胡华威. 基于 DTD 在关系型数据库中存储 XML 文档[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(19): 5073-5076(in Chinese).
Zhang Yan, Zhai Xueming, Hu Huawei. Storing XML documents in relational database based on DTD[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(19): 5073-5076(in Chinese).
- [17] 张海宁, 笃峻, 祁忠, 等. 稳定控制信息管理系统的 Web 发布系统[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 128-131.
Zhang Haining, Du Jun, Qi Zhong, et al. Web publishing system of power security and stability control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 128-131(in Chinese).
- [18] 高强, 童晓阳, 刘志刚, 等. 基于 AJAX 的变电站嵌入式 Web 发布系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 57-60.
Gao Qiang, Tong Xiaoyang, Liu Zhigang, et al. Design and implementation of an embedded web publishing system based on AJAX in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 57-60(in Chinese).
- [19] 陈星莺, 孙想坚, 钱锋. 一种基于追踪技术的快速电力网络拓扑分析方法[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 22-24.
Chen Xingying, Sun Shujian, Qian Feng. A fast power system network topology based on tracking technology[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 22-24(in Chinese).
- [20] 吴文传, 张伯明. 基于图形数据库的网络拓扑及其应用[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 14-18.
Wu Wenchuan, Zhang Boming. A graphic database based network topology and its application[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 14-18(in Chinese).
- [21] 朱文东, 刘广一, 于尔铿, 等. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术, 1996, 20(3): 30-33.
Zhu Wendong, Liu Guangyi, Yu Erkeng, et al. The fast calculation method of local power network topology[J]. Power System Technology, 1996, 20(3): 30-33(in Chinese).
- [22] Draft IEC61970, Energy management system application program interface(EMS-API)-Part1: Guidelines and General Requirement[S].
- [23] Draft IEC61970, Energy management system application program interface(EMS-API)-Part301: common information mode(CIM)base[S].
- [24] Draft IEC61970, Energy management system application program interface(EMS-API)-Part501: CIM RDF schema[S].



刘若溪

收稿日期: 2010-08-22.

作者简介:

刘若溪(1982), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析, E-mail: Liuruoxi0121123@163.com;

张建华(1952), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析、电力应急管理。

(责任编辑 王晔)