

电力市场下区域间输电能力的定义和计算

李国庆, 董 存

(东北电力学院, 吉林 132012)

摘要: 阐述了在电力市场新形势下的可用输电能力计算问题, 介绍了可用输电能力的定义、计算原则及相关的新术语; 提出了使用连续潮流法计算可用输电能力的步骤。

关键词: 电力市场; 电网互联; 可用输电能力; 最大输电能力

中图分类号: TM 744; F 123. 9

0 引言

对于一个大型的互联电力系统, 其区域间的输电能力对于整个系统的安全可靠性有着很大的影响。电力市场的引入, 又使其具有了市场信号的功能。由于电力市场的竞争, 迫切需要利用现有的输电网络来输送更多的电力, 以最大限度地降低成本, 所以激烈竞争的电力系统已经不得不把其运行极限研究作为提高经济效益的主要手段。电力市场下的各方参与者迫切需要输电网络的输电能力信息, 以指导其在电力市场下的各种商业行为。

1996 年, 美国联邦能源规划委员会(FERC)制定了一系列法令, 其中的 889 号令^[1]提出了对一商业性可行的电力市场计算其可用输电能力(available transfer capability, 缩写为 ATC)的要求。这些计算值应发布在一通信系统上, 该通信系统称为网络开放实时信息系统(open access same-time information system)^[2]。其目的是通过提供这样一个输电系统传送能量能力的市场信号, 进一步促进大型输电网络的开放使用, 从而促进发电或能量市场的竞标。如何准确地确定电力市场下电力系统区域间的可用输电能力(ATC), 使系统在满足安全性和可靠性的前提下, 最大限度地满足电力市场各方参与者的要求, 成为新形势下电力系统所面临的急待解决的研究课题。

1 可用输电能力的基本概念

1.1 可用输电能力的定义

1995 年 3 月, 北美电力系统可靠性委员会(NERC)修订了其早期关于输电能力的文献, 提供了进一步的解释和示例。根据其 1995 年文献中的定义^[3], 所谓一个系统两区域间的输电能力, 是指在至

少满足下述 A1~A3 约束条件下, 通过两区域间的所有输电回路, 从一个区域向另一个区域可能输送的最大功率。

A1: 在无故障发生的正常方式下, 系统中所有设备(包括线路)的负荷及电压水平在其额定范围内。

A2: 在系统中单一元件(如输电线、变压器或发电机)停运的故障条件下, 系统能够吸收动态功率振荡, 维持系统的稳定性。

A3: 当 A2 中描述的事故发生且系统功率振荡平息后, 在调度员进行与故障相关的系统运行方式调整之前, 所有设备(包括输电线)的功率及电压水平应在给定的紧急事故条件下的额定范围内。

由于输电网络的开放, FERC 近期的一些相关规定增加了对定量计算电力系统输电能力的强调。从一个商业化的角度来看, 形成输电网络输电能力统一定义的关键因素在于电力市场环境中, 在各种系统运行条件下, 给定时间内所能购买或销售的输电能力的数量。输电网络开放强调了互联电力网络的使用, 因此, 预计将来的电力功率传输会在更广泛的系统条件下增长, 使输电网络的安全运行更加复杂。为了有效地保证系统的安全性, 那些计算、汇报、发布及使用这一信息的人必须对其商业性应用的意义有一个共识。为达到这一目的, 文献[4]对于商业性可行的电力市场建立了一个框架, 用于计算互联输电网络的可用输电能力(ATC), 并且也给出了 ATC 的计算原则。

输电网络可用输电能力(ATC)这一信息对电力市场的所有参与者来说都是非常重要的。ATC 是在协议使用基础上, 实际输电网络保留输电能力的尺度, 以利于进一步的商业活动^[4]。ATC 可以表示为:

$$ATC = TTC - TRM - ETC \text{ (包括 CBM)}$$

其中, TTC 为最大输电能力; TRM 为输电可靠性裕度; ETC 为现存输电协议量(包括零售用户服务);

CBM 为容量效益裕度。

最大输电能力(TTC)是在一可靠方式下互联输电网络上传输的功率量,同时满足一组指定的故障前后系统条件。输电可靠性裕度(TRM)定义为必要的输电网输电能力,以确保互联输电网络在系统条件不确定的合理范围内是安全的。容量效益裕度(CBM)定义为负荷供应单位储备的输电网输电能力的数量,以确保从互联系统获得出力,满足发电可靠性要求。

现存输电协议量(ETC)本质上包括在给定条件下所有正常的输电潮流。根据 ETC 和 CBM 合同的稳定程度,这两个量可以使用诸如“可撤销”和“不可撤销”(或“恒定”和“非恒定”)、“计划”和“预约”传输来进一步描述^[5]。可得到 4 种输电服务用语: NRES(不可撤销的预约输电服务)、NSCH(不可撤销的计划输电服务)、RRES(可撤销的预约输电服务)、RSCH(可撤销的计划输电服务)。

两区域间的 ATC 提供了一种指示,即在一组指定的条件下某一时间范围内从一个区域到另一个区域能够传输的额外功率量。ATC 是一个动态量,因为它是一组可变和相互影响的参数的函数。这些参数与网络的条件密切相关。所以,ATC 的计算值需要阶段性地更换。由于整个网络条件的影响,ATC 计算值的精确性取决于可获得的输电网络数据的完整性和准确性。

1.2 可用输电能力的原则

ATC 是一技术特性尺度,用来衡量互联输电网络如何运行以满足商业性输电服务要求,因此必须满足一定的原则,以平衡技术性和商业性的问题。ATC 必须准确反映输电网络的实际情况,同时计算又不太复杂,以避免不恰当地限制了商业性。如下的原则指明了计算和应用 ATC 的要求:

a. ATC 计算必须产生商业性的可行结果。计算得到的 ATC 的值必须是电力市场可用输电能力的一个合理并且可靠的指示。

b. ATC 计算必须考虑整个互联输电网络上随时间变化的潮流状况。另外,必须从可靠性的观点考虑整个互联网络上同步传输和并行路径潮流的影响。

c. ATC 计算必须考虑 ATC 与功率注入点、穿越互联网络的传输方向和功率流出点的关系。所有部门必须提供必要的、充足的信息用于计算 ATC。

d. 各子区域或整个区域的合作是必要的,以形成和发布合理反映互联输电网络 ATC 的信息。

e. ATC 计算必须遵守 NERC、各区域、电力联合组织和个别系统的安全规划和运行政策、标准或准则。

f. ATC 的计算必须能容纳系统状态中合理的不确定性,并且提供运行灵活性,以确保互联输电网络的可靠运行。

2 可用输电能力的商业化成分

为了更好的定义 ATC,必须考虑输电服务专门商业化成分。介绍 2 个概念:可削减的输电服务和可撤销的输电服务。

可削减的输电服务(curtilability)定义为输电网所有者因受输电网络输电服务能力的约束,而中断所有或部分输电服务的权力。输电服务只有在系统可靠性遭到威胁或紧急条件存在时才能被削减。在输电服务费用中要指出削减的步骤、条款和状况,当这些约束不再限制输电网络输电能力时,输电服务可被重新恢复。可削减的输电服务不适用于由于经济原因中断输电服务的情况。

可撤销的输电服务(recallability)定义为输电网所有者由于各种原因(包括经济性的)中断所有或部分输电服务的权力。这与 FERC 政策和输电网所有者输电服务费用或合同条款是一致的。

基于可撤销的输电服务概念,以下定义 ATC 的 2 个商业方面的应用:

不可撤销的可用输电能力(non-recallable ATC, 缩写为 NATC),用数学公式表示: $NATC = TTC - TRM - NRES$ (包括 CBM)。

可撤销的可用输电能力(recallable ATC, 缩写为 RATC),在运行和规划范围内必须分别用数学公式表示为:

a. 规划范围

$$RATC = TTC - a(TRM) - RRES - NRES(\text{包括 CBM})$$

b. 运行范围

$$RATC = TTC - b(TRM) - RSCH - NSCH(\text{包括 CBM})$$

这里 $0 < a < 1, 0 < b < 1$, 其值由输电网所有者基于网络可靠性考虑确定。在实际计算时,还要考虑到服务的优先级。不可撤销和可撤销的输电服务必须坚持一组广泛应用于整个电力市场的优先级,以避免混淆。这些优先级在文献[4]中有详细规定。

3 可用输电能力的计算框架

图 1 给出了实际在线计算 ATC 的框架^[6]。在一个能量管理系统(EMS)中,ATC 程序与如下模块连接:状态估计(SE)、安全分析(SA)、实时运行规划(current operating plan, 缩写为 COP)和网络开放实时信息系统(OASIS)。

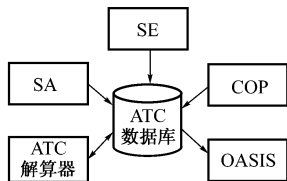


图1 在线 ATC 计算框架

Fig. 1 Framework for on-line ATC calculation

由状态估计(SE)获得系统当前状态,由安全分析(SA)获得事故预想集,由实时运行规划(COP)获得负荷预测、发电计划和故障设备信息。所计算的ATC值传送并发布在网络开放实时信息系统(OASIS)上。传送到OASIS的典型值包括界面标识、运行的日期和时间,约束设备的列表、最大输电能力(TTC)及可用输电能力(ATC)。重点是可用输电能力(ATC)信息的发布及使用^[7]。

4 可用输电能力的计算方法

4.1 网络响应法和额定系统路径法

FERC 的 889 号令中给出的计算 ATC 的要求为电力工业提出了一个重大课题。必须结合完整的技术准则以发展实际的计算方法,为电力市场提供商业性可行的输电能力信息^[8]。任何单个的电力系统、电力联合组织、各子区域可以在遵守上述原则的基础上,发展其自己的方法用于计算 ATC^[6,9,10]。文献[4]中给出了 2 种计算 ATC 的方法:网络响应法和额定系统路径法。

4.1.1 网络响应法^[4]

该方法应用于高密度、复杂的输电网络,该网络中负荷需求、电源及输电系统紧密相连。计算 ATC 需要把区域间的贸易转化为输电网络上的电力潮流。网络的响应特性基于线路的故障、功率传输及故障传输分配因子。

当电力传输发生在两个区域间,整个网络对该贸易发生响应。每条输电路径上的潮流按照路径对传输响应的比例发生变化。每条输电路径上潮流的变化取决于网络拓扑、发电调度、负荷需求水平、通过该区域的其他贸易和该路径会做出响应的其他区域间的一些贸易。

输电网络个别设备未使用的容量是设备额定值与当前潮流负荷的差值,也称之为可用负荷容量。对于区域间的传输,用可用负荷容量除以路径设备的响应特性,这一过程得出了个别路径的 ATC。对于一个不同的电力传输,需要一组新的网络响应和一组新的极限设备的可用容量,以计算该传输下各路径的 ATC。作为一个整体,网络的 ATC 代表了每一时段内由每一个设备所确定的 ATC 中的最小值。

对于不同时段,ATC 是不同的,不同的时段可能会由不同的设备决定。

4.1.2 额定系统路径法^[4]

用于 ATC 计算的额定系统路径法一般用于以稀疏网络为特征的输电系统,该输电系统中负荷需求与出力中心相距遥远。一般在使用这种方法时要明确网络区域间的路径,并确定适当的系统约束。对于这些明确的路径及输电网所有者之间的互联线路计算 ATC。

额定系统路径法包括 3 个步骤:①确定路径的最大输电能力(TTC);②对于多个所有权的路径在所有者之间分配 TTC,以确定所有者的权限;③从每个所有者各自的 TTC 权限中减去其所使用的每一部分输电能力,以计算其各自的 ATC。通过遵循一区域性评估过程的方式计算 TTC,从而达到整个区域的合作。这一过程确保了单个系统、电力联合组织、各子区域和整个区域的合作以及对互联输电网络约束和状态的必要考虑。

额定系统路径法包括在输电网所有者之间分配 TTC 及 ATC 的步骤。应当注意到额定系统路径的分配方法并不是分配输电服务中惟一可遵循的方法。

4.2 使用连续潮流法计算 ATC

作为一种求解非线性代数方程的数值方法,连续潮流法(continuation power flow,缩写为 CPF)早在 70 年代就已在电力系统潮流方程的求解中获得了尝试性的应用。当时 CPF 只是作为对常规潮流计算方法的一种补充,并没有发挥其真正的价值,该方法真正引起人们的关注还是在 90 年代,这是因为该方法在电压稳定性研究方面有其独特的优越性^[11]。

在潮流计算问题中,CPF 是寻找一组母线注入变化的函数中标量参数最大值所普遍使用的方法。CPF 最初是用于计算最大负荷点,在原则上不需要变化,CPF 就可以用于其他用途,包括 ATC 的计算。

ATC 的计算是在指定的方式下确定电源母线和负荷母线两组母线间传输的超越于基态之上的最大增加功率的数量。输电能力的增加会增加网络的负荷,在某一点会达到运行或物理极限,从而阻止输电能力的进一步增加。这种限制可能包括热负荷限制(支路功率和负荷极限)、电压限制(母线电压越限)和稳定限制(电压稳定限制、暂态和动态相角稳定限制)。另外,在确定该值时考虑了故障的影响。

下面结合文献[12],给出一段时间内在一系列电源/负荷传输方案下使用连续潮流方法求解 ATC 的步骤:

a. 确定功率传输方案。

b. 使用连续潮流追踪正常运行状态的解曲线,并记录由鞍点及各种约束确定的最大传输功率。

c. 严重故障选择。分别对系统进行基于支路过负荷、低电压越限和鞍点分叉的故障排序。

d. 对严重故障选择中排出的前 n 个严重故障分别用连续潮流法求解故障下的解曲线,并记录对应这些约束下系统区域间的最大输电量。

e. 确定区域间最大输电能力。利用步骤 d 的结果,由不同约束确定的最大输电能力中的最小值为该方案下的最大输电能力。

f. 由最大输电能力、基态潮流和恰当的输电裕度计算该方案下的可用输电能力。

g. 返回步骤 a,计算下一个传输方案。

当处理完给定时段内所有传输方案后,进入下一个时段,重复上述步骤。ATC 计算方案潜在的数目是巨大的,不仅是因为有许多电源负荷母线组,而且对每一个电源负荷母线组,新的基态潮流都会使 ATC 的计算重新开始。

5 结语

电力市场下互联输电网络的可用输电能力信息对于电力市场各方参与者的商业行为起着指导作用,因而是非常重要的。本文介绍了对商业性批发市场计算互联输电网络 ATC 的框架。不同的电力公司在遵循上述原则的基础上,可以发展自己计算 ATC 的方法。随着使用中获得的经验以及了解更多有关竞争性的电力市场如何运作的情况,这一计算框架可以被扩展和修改,从而使其能为电力市场提供有关输电能力更为详实、准确和及时的信息。

参考文献

- 1 Federal Energy Regulatory Commission. Open Access Same-Time Information System (Formerly Real-Time Information Networks) and Standards of Conduct. Docket No. RM95-9-000, Order 889, 1996
- 2 Tian Y, Gross G. OASISNET: An OASIS Network Simulator. IEEE 1998 PES Winter Meeting. Tampa, FL: 1998
- 3 Transmission Transfer Capability. A Reference

Document for Calculating and Reporting the Electric Power Transmission Capability of Interconnected Electric Systems. North American Electric Reliability Council, 1995

- 4 Available Transfer Capability Definitions and Determination: A Reference Document Prepared by TTC Task Force. North American Electric Reliability Council, 1996
- 5 Saucer P W, Grijalva S. Error Analysis in Electric Power System Available Transfer Capability Computation. Decision Support System, 1999, 24(3-4): 321~330
- 6 Ejebe G C, Tong J, Waight J G, et al. Available Transfer Capability Calculations. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4):1521~1527
- 7 Saucer P W. Technical Challenges of Computing Available Transfer Capability (ATC) in Electric Power System. Proceedings of HICSS-30 Conference, 1997
- 8 Gravener M H, Chika Nwankpa. Available Transfer Capability and First Order Sensitivity. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(2)
- 9 Vojdani A R. Computing Available Transmission Capacity Using Trace. EPRI Power System Planning & Operation News, 1995, 1(1)
- 10 Rezania E, Shahidehpour S M. A Fast Contingency Method for Determination of Available Transfer Capability in Deregulated Environment. Proceedings of the American Power Conference, 1997, 59(1): 683~688
- 11 王成山,李国庆,余贻鑫,等(Wang Chengshan, Li Guoqing, Yu Yixin, et al). 电力系统区域间功率交换能力的研究(Study on Transmission Transfer Capability of Interconnected Electric Power Systems). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1999,23(3);1999,23(4)
- 12 李国庆(Li Guoqing). 基于连续型方法的大型互联电力系统区域间输电能力的研究:[博士学位论文](Study of Transmission Transfer Capability of Large Scale Interconnected Power Systems Based on Continuation Method, Thesis). 天津:天津大学(Tianjin: Tianjin University), 1998

李国庆,男,博士,教授,主要从事电力系统的安全性与稳定性等方面的研究。

董存,男,硕士研究生,主要从事电力系统的安全性与稳定性方面的研究。

DETERMINING AVAILABLE TRANSFER CAPABILITY OF A LARGE INTERCONNECTED POWER SYSTEM FOR ELECTRICITY MARKET

Li Guoqing, Dong Cun (Northeast China Institute of Electric Power Engineering. Jilin 132012. China)

Abstract: The available transfer capability (ATC) of large interconnected power system for electricity market is clarified. The definition, determining principle and related new terms of ATC is introduced. Steps of determining the ATC using continuation power flow are also presented.

This project is supported by Science and Technology Development Fund in Jilin Province (No. 19980537).

Keywords: electricity market; interconnected power system; available transfer capability; maximum transfer capability