

考虑电力系统阻塞的电网充裕度评价

韩如月¹, 万秋兰²

(1. 内蒙古工业大学 电力学院, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010080;

2. 东南大学 电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

Power Network Adequacy Assessment Considering Transmission Congestion

HAN Ruyue¹, WAN Qiulan²

(1. Electric Power College, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Previous researches on network adequacy mostly focused on the measurements of the system reliability caused by component failures, but under market environment impact of congestion on network adequacy must be considered. Through the research on new features of power network transmission under market environment, different states of power network transmission are defined. The indices to measure transmission line congestion are proposed to evaluate the inadequacy of network transmission capacity and apply in the expansion planning and operation schedules of power grid. Based on Monte Carlo method a model to calculate the adequacy indices is built. Considering various uncertainty factors, market simulation of IEEE 24-bus system and simulation calculation are performed, and results of simulation and calculation show that the proposed indices can effectively recognize the bottlenecks during transmission congestion. The line congestion risk index defined in this paper can be used to evaluate the risk of transmission congestion, and it is also available to constitute new criterion in the expansion planning and to offer reference for congestion management.

KEY WORDS: congestion; power network adequacy; line congestion risk value

摘要: 通过研究市场环境下电网传输的新特点, 定义了电网传输的不同状态。提出了衡量线路阻塞程度的指标, 用于评价电网传输能力的不充裕性, 并应用于电力系统的扩展规划和运行计划。基于蒙特卡罗方法建立了计算充裕度指标的模型, 考虑各类不确定性因素, 对 IEEE-24 节点系统进行了市场模拟和仿真计算, 结果表明, 所提指标能有效识别电网传输中的瓶颈。线路阻塞风险指标可评估输电阻塞的风险, 在电网规划中可构成新的规划准则并为阻塞管理提供依据。

关键词: 阻塞; 电网充裕度; 线路阻塞风险

0 引言

充裕度是电网方案规划的重要依据, 但传统的

充裕度指标只反映系统总体的满足负荷电力和电量的充裕程度, 如何准确地找到牵制系统可靠性的瓶颈, 确定系统最需要投资改造的薄弱环节成为近来学者关注较多的内容^[1-2]。传统方法是基于传统的考虑元件物理特性的可靠性评估, 只反映了元件故障或系统事故对可靠性的影响, 而没有考虑市场对可靠性的影响。

实际上在电力市场环境下, 电网运行的目标不仅是满足用户的用电需求, 还包括尽量保证各电力交易的顺利实现。而输电网络有限的传输容量可导致阻塞, 它比事故发生的概率要高得多, 因此, 研究市场环境下阻塞影响电力网络传输能力的潜在的技术和经济因素及如何对它们进行评价显得尤为重要。

文献[3]以系统阻塞指标和系统阻塞成本作为评估网络的可靠性指标和运行指标; 文献[4]提出了新的阻塞集中度指标用于评估网络充裕度; 文献[5-7]也提出新的考虑阻塞的指标或算法。上述研究都期望通过在电网扩展规划中考虑阻塞的影响来引导出合理的输电资源, 从根本上消除阻塞。文献[8]研究了阻塞引起的利润损失并分摊到线路, 再与消除阻塞所需的扩建费用进行比较, 为电网的经济决策提供理论依据。

基于此背景, 本文首先通过研究市场环境下电网传输的新特点, 定义电网传输的不同状态。在此基础上提出规格化线路削减阻塞电量和线路阻塞风险指标, 将这 2 个指标用于评价电网传输能力的不充裕性并应用于电力系统扩展规划和运行计划。最后, 基于蒙特卡罗方法对 IEEE-24 节点系统进行仿真。

1 电力市场环境下电网传输特点

在市场环境下，电网传输电能既受物理系统的制约又受交易行为的影响。物理系统的约束主要有线路过热限制、传输功率极限等；市场交易行为作用使上网电量取决于各发电公司报价及交易的结果，电网的最终潮流分布则是这 2 方面因素综合的结果。为描述电网传输在电力市场环境下所呈现的特点，本文定义了电网传输所具有的以下不同状态：

1) 不考虑交易，只取决于物理系统功率平衡的电网传输潮流定义为网络流，其数学模型为系统的常规潮流。

2) 考虑交易，但无线路约束下进行出清的电网传输潮流定义为交易流。

在市场机制追求社会效益最大化，也即社会成本最小的条件下，若采用直流潮流，且忽略网损，其优化模型^[9]为

$$\begin{aligned} \min J = & \sum_{i=1}^{N_G} C_i(g_i) - \sum_{j=1}^{N_D} B_j(d_j) \quad (1) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{j=1}^{N_D} d_j - \sum_{i=1}^{N_G} g_i = 0 \\ g_{i,\min} \leq g_i \leq g_{i,\max}, i = 1, 2, \dots, N_G \\ d_{j,\min} \leq d_j \leq d_{j,\max}, j = 1, 2, \dots, N_D \end{cases} \end{aligned}$$

式中： $C_i(g_i)$ 为发电机 i 的报价函数； $B_j(d_j)$ 为负荷 j 的报价函数。约束条件式分别为网络平衡方程、发电厂机组容量约束和负荷容量约束， N_G 为发电机组节点数； N_D 为负荷节点数； g_i 为发电机出力； $g_{i,\max}$ 和 $g_{i,\min}$ 为发电机容量上下限； d_j 为负荷功率； $d_{j,\max}$ 和 $d_{j,\min}$ 为负荷容量上下限。

既考虑交易又考虑安全校核(即有线路约束出清)的电网潮流定义为运营流。其数学模型在式(1)的基础上增加了线路容量约束

$$z_{l,\min} \leq z_l(\mathbf{g}, \mathbf{d}) \leq z_{l,\max}, l = 1, 2, \dots, N_L \quad (2)$$

式中： z_l 为线路潮流； $z_{l,\max}$ 和 $z_{l,\min}$ 为线路容量上下限； \mathbf{g} 和 \mathbf{d} 分别是 g_i 和 d_j 的向量形式； N_L 为线路总数。

以一个 3 节点系统为例，说明上述定义的电网传输的网络流、交易流和运营流的不同概念，如图 1 所示。

2 考虑阻塞的电网充裕度评价指标

2.1 线路削减阻塞电量

2.1.1 线路削减阻塞电量的定义

线路削减阻塞电量指标，可用于评价电网传输

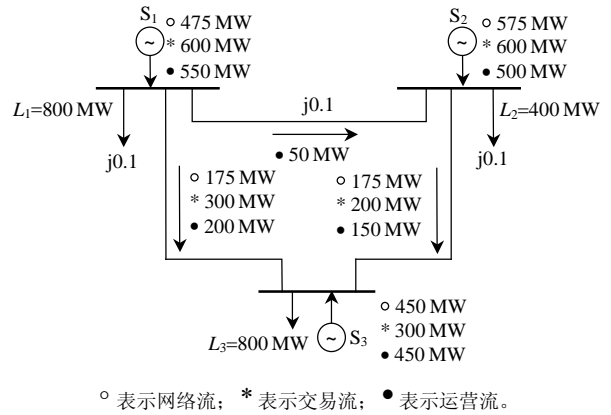


图 1 电力市场环境下的潮流分布
Fig. 1 Power flow in electricity market

能力的不充裕性，反映系统传输中潜在的传输能力问题。某研究周期内的线路削减阻塞电量定义为

$$\sum_{k=1}^n (P_{(\text{trade})ij} - P_{(\text{max})ij}) t_k \quad (3)$$

式中： $P_{(\text{trade})ij}$ 为线路 ij 在第 k 段时间内的交易流，即无线路约束出清时线路 ij 上流过的功率， $P_{(\text{trade})ij}$ 的计算可通过式(1)计算得到； $P_{(\text{max})ij}$ 为线路 ij 传输功率的极限值。取热极限功率和稳定极限功率 2 者中较小者为 $P_{(\text{max})ij}$ ； t_k 为第 k 段时间的长度； n 为研究周期内线路 ij 发生阻塞的时间段的段数。

如果已知引起线路阻塞的事件或系统状态(如负荷的大小)的概率，线路削减阻塞电量可以表示为

$$\sum_{i=1}^m (P_{(\text{trade})ij} - P_{(\text{max})ij}) p_i T \quad (4)$$

式中： T 为研究周期的时间总长度； p_i 为某事件或某系统状态在 T 内发生的概率； m 为事件或状态数。

2.1.2 规格化线路削减阻塞电量

线路削减阻塞电量是一个绝对指标，它可以用来衡量这条线路在研究期间内由于容量不充裕而削减的绝对电量，但却无法比较线路之间的容量不充裕性。为此，本文定义规格化线路削减阻塞电量的概念，它是一个相对指标，可用来比较线路之间的容量不充裕性。定义如下

规格化线路削减阻塞电量=

$$\frac{\text{线路削减阻塞电量 (研究周期内)}}{\text{线路最大传输电量 (研究周期内)}}$$

$$\frac{\sum_{k=1}^n (P_{(\text{trade})ij} - P_{(\text{max})ij}) t_k}{P_{(\text{max})ij} T} \quad (5)$$

式中： $T \geq \sum_{k=1}^n t_k$ ，即 T 既包含了线路发生阻塞时的持续时间，也包含了不发生阻塞的时间。

规格化线路削减阻塞电量指标反映了研究周期内线路阻塞所占的比重，是一个数值小于或等于 1 的值。该值可直观地对诸多线路的阻塞程度进行比较。

2.2 线路阻塞风险

2.2.1 线路阻塞风险的定义

基于风险的定义^[10]，本文定义了输电系统中线路的阻塞风险，对输电线路阻塞的可能性和损失程度加以量化，反映了输电系统容量不充裕的风险。其表达式为

$$R_{ij} = \sum_j p(x_j) p(c_{\text{ongij}} | x_j) C(c_{\text{ongij}} x_j) \quad (6)$$

式中： R_{ij} 为线路 ij 的风险； $p(x_j)$ 为系统状态 x_j 的概率，文中指系统某一负荷水平出现的概率， $p(c_{\text{ongij}} | x_j)$ 为在系统状态 x_j 下线路 ij 出现阻塞的概率， $C(c_{\text{ongij}} x_j)$ 为在系统状态为 x_j 时线路 ij 出现阻塞的经济后果。

2.2.2 线路阻塞损失

本文将社会福利损失^[11](loss of social benefit expectation, LOSBE)这一概念引入，用来计算线路阻塞造成的后果，即经济损失。计算式为

$$L_{\text{LOSBE}} = I_{\text{ISB}} - E_{\text{ESB}} \quad (7)$$

式中： E_{ESB} 为社会福利期望(expected social benefit, ESB)值，定义为电力市场环境下对现有网络所有线路进行有约束出清时的社会福利， $E_{\text{ESB}} = \sum_{j=1}^{N_D} B_j(d_j) -$

$\sum_{i=1}^{N_G} C_i(g_i)$ ，计算模型与前面定义的运营流的模型相

同； I_{ISB} 为理想的社会福利期望(ideal social benefit, ISB)值，定义为现有网络中除线路 ij 没有容量限制(此时线路容量足够大)时其余线路进行有约束出清的社会福利。

当发电侧和负荷侧均参与投标， I_{ISB} 的计算模型同 E_{ESB} ，只是线路约束变为

$$z_{l,\min} \leq z_l(\mathbf{g}, \mathbf{d}) \leq z_{l,\max}, l = 1, 2, \dots, N_L - 1 \quad (8)$$

I_{ISB} 和 E_{ESB} 的差值即为由于线路 ij 容量不充裕造成阻塞时引起的社会福利的损失 L_{LOSBE} 。因此， L_{LOSBE} 可以用来度量阻塞的后果 $C(c_{\text{ongij}} x_j)$ 。

3 考虑阻塞的电网充裕度评价

3.1 电网规划充裕度评价

基于电力市场环境下的规划目标，既考虑技术约束又考虑经济效益，本文将阻塞风险指标引入电网规划。考虑阻塞风险指标的输电网扩展规划模

型为

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{S}) &= \sum_{l=1}^L (C_l S_l - R_{YL}) \quad (9) \\ \text{s.t.} &\begin{cases} P_L \leq P_{L,\max} \\ B\theta = P \\ P_G \leq P_{G,\max} \end{cases} \end{aligned}$$

式中： \mathbf{S} 为一个用于表示规划方案的 L 维向量，其中变量 S_l 为候选线路 l 的 0—1 决策变量， S_l 取 1 或 0 分别表示该线路包括或不包括在规划方案之中； C_l 为候选输电线路 l 的成本费用； R_{YL} 为候选线路因阻塞引起的年风险损失，用线路阻塞风险指标度量； L 为候选线路的数目； P_L 为线路功率向量；为线路输电容量向量； B 为节点电纳矩阵； θ 为节点电压相角向量； P 为节点净注入功率向量； P_G 为发电机出力向量； $P_{G,\max}$ 为发电机出力上限向量。目标函数的意义是扩建线路的成本可补偿该线路因阻塞引起的损失代价最小。在进行规划时可应用前面定义的规格化线路削减阻塞电量指标选择候选扩展线路。

3.2 电网运行充裕度评价

电力市场环境下运行计划颇为复杂，交易多变、潮流多变，分析输电的瓶颈可为消除电网传输中的阻塞提供必要的信息。在进行年度运行计划时采用规格化线路削减阻塞电量可有效识别瓶颈线路，尤其在诸多阻塞线路中，可直观地对这些线路的阻塞程度进行比较，按阻塞程度的不同采用不同的方式进行处理，使阻塞处理效果与效益都达到最好。

4 算例

4.1 线路削减阻塞电量

本文算例为 IEEE-24 可靠性测试系统(reliability test system, RTS)。系统中的 32 台发电机分属于 14 个发电公司，17 个负荷即为 17 个配电公司，系统网络参数见文献[12]。

本文用蒙特卡罗模拟法^[13-15]建立了计算线路削减阻塞电量的概率模型。为了重点研究市场环境下交易对阻塞的影响，暂忽略发电机随机故障、输电线路随机故障这 2 类不确定性因素，只考虑发电厂报价和节点负荷的随机波动 2 类不确定因素。这样，对某一交易日进行一次抽样，确定发电报价和负荷需求，进行市场模拟，得到当日的削减阻塞电量。累计可计算得一年的指标值。

经计算,发生阻塞的线路有7条,表1中仅列出了3条线路的削减阻塞电量。可以看到,线路3-24的削减阻塞电量的绝对值大于线路8-9,但是,规格化后的线路削减阻塞电量却小于线路8-9,即相对值的比较可以更好地反映线路的不充裕性。表1中,线路14-16的削减阻塞电量的绝对值和规格化后的值均最大,说明该线路阻塞最严重,线路传输容量最不充裕。

表1 一年的线路削减阻塞电量

Tab. 1 Line usage curtailment in one year

线路编号	线路削减阻塞电量/MW·h	规格化线路削减阻塞
线路3-24	171 400	0.049 1
线路8-9	169 900	0.111 1
线路14-16	1 942 600	0.444 7

4.2 线路阻塞风险

本文已统计出各负荷水平在一年中的概率。市场采用单边报价,通过蒙特卡罗模拟计算得到各线路的阻塞概率和阻塞后果如表2所示。其中,有些线路阻塞引起的社会福利损失很小,在此忽略不计,社会福利损失是每h的值。

表2 不同负荷水平下的线路阻塞风险

Tab. 2 Line congestion risk value in different load level

负荷水平/%	阻塞线路	阻塞概率	社会福利损失/USD	风险/USD
60	8-9	0.99	0.01	0.001 8
	14-16	1.0	2 248.93	407.06
	16-17	1.0	0	不计
70	3-24	0.003	0	不计
	7-8	0.045	0	不计
	8-9	0.995	0	不计
	8-10	0.438	0	不计
	14-16	1.0	4 509.46	1 673.01
	16-17	1.0	0	不计
100	3-24	1.0	0	不计
	6-10	1.0	143.524	3.59
	14-16	1.0	16 962.834	424.07
	16-17	1.0	0	不计

对表2的结果进行分析,可以得到以下几点:

1) 在某一负荷水平下,各线路的阻塞概率不尽相同。在各个负荷水平下,线路14-16和线路16-17的阻塞概率均为1.0,即每次交易都发生阻塞。其余线路的阻塞概率在各负荷水平下不尽相同。

2) 在负荷为100%时,线路14-16的阻塞引起了很大的经济损失。同时,线路16-17阻塞概率虽然和线路14-16一样,但线路16-17因容量不充裕引起阻塞的经济损失相对较小,可以忽略。同样,也有可能出现2条线路引起的经济损失相差

不大,但出现阻塞的概率相距较大的情况。这体现了用风险而不是仅用阻塞概率或仅用经济损失来评估线路容量不充裕性的意义。

3) 在其它负荷水平下,有一些线路的阻塞概率也较大,但它们的容量不充裕所引起的经济损失却特别小,甚至为零。这说明,单纯增加这些线路的容量并不能有效改善社会福利。只有引起经济损失较大的瓶颈线路才制约了负荷点从报价较低的发电商处买电。

4) 综合表2中的数据可以看到,无论负荷水平大小,线路14-16的阻塞概率和其所引起的社会福利的损失都是最大即风险最大。因此线路14-16是此系统的瓶颈线路。在进行网络扩展规划时,首先考虑线路14-16的扩建。

在进行了线路14-16的扩建后,再次计算各线路的年阻塞风险如表3所示,由表3可见,其余各线路的不充裕大多引起社会福利的损失。这也再次表明,线路14-16的确是系统的主要瓶颈线路。在未扩建前,它引起的社会福利损失占相当大的比重,以至于其余各线路的社会福利损失无法与其相比。逐一计算,得到线路扩展规划的顺序如表4所示。

表3 扩建14-16线路后各线路年阻塞风险

Tab. 3 LCRV in one year after line 14-16 expansion

线路	风险/USD
3-24	4.617
7-8	不计
6-10	10.416
8-10	不计
8-9	52.268
16-17	686.836

表4 线路扩展规划顺序结果

Tab. 4 Order of line expansion

线路扩建的次序	线路
1	14-16
2	16-17
3	8-9
4	6-10
5	3-24

5 结论

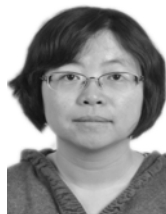
1) 电力市场环境需考虑阻塞对网络传输能力的影响,并应对阻塞造成的经济损失进行评价。本文定义的规格化线路削减阻塞电量指标和线路阻塞风险指标,可以反映电网传输中线路潜在的传输能力问题,有效识别输电瓶颈。

2) 线路阻塞风险指标既考虑阻塞概率,又考虑经济损失,可评价阻塞带来的风险,因此,在电

网规划中可构成新的规划准则并为阻塞管理提供依据。

参考文献

- [1] 赵渊. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析及其校正措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [2] 王锡凡. 电网可靠性评估的随机网流模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 1-6.
Wang Xifan. Probabilistic network—flow models for reliability evaluation of power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 1-6(in Chinese).
- [3] 付蓉, 魏萍, 万秋兰, 等. 市场环境基于系统阻塞指标约束的多阶段输电网规划[J]. 继电器, 2006, 34(10): 55-59.
Fu Rong, Wei Ping, Wan Qiulan, et al. Congestion index based multi-stage transmission expansion under market environment[J]. Relay, 2006, 34(10): 55-59(in Chinese).
- [4] 付蓉, 魏萍, 万秋兰, 等. 市场环境计及阻塞集中度指标的输电网扩展规划[J]. 继电器, 2007, 35(10): 28-32.
Fu Rong, Wei Ping, Wan Qiulan, et al. Congestion concentration index based transmission expansion planning under market environment[J]. Relay, 2007, 35(10): 28-32(in Chinese).
- [5] 金义雄, 程浩忠, 严健勇, 等. 计及阻塞管理及剩余容量的并行粒子群电网规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 18-23.
Jin Yixiong, Cheng Haozhong, Yan Jianyong, et al. Parallel particle swarm optimization on power transmission network planning taking account of congestion management and residual capacity[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 18-23(in Chinese).
- [6] 谢敏, 陈金富, 段献忠. 考虑阻塞管理的一种启发式电网规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 66-69.
Xie Min, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. A heuristic transmission network planning method considering congestion management[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 66-69(in Chinese).
- [7] 孙旭, 任震. 市场环境电网优化规划的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 41-44.
Sun Xu, Ren Zhen. Study on optimum power grid planning in market environment[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 41-44(in Chinese).
- [8] 姚文峰, 姚建刚, 刘昌, 等. 线路阻塞引起的电网机会成本分析[J]. 继电器, 2005, 33(17): 53-57.
Yao Wenfeng, Yao Jian-gang, Liu Chang, et al. Analysis of electric network opportunity cost caused by congestion[J]. Relay, 2005, 33(17): 53-57(in Chinese).
- [9] Wei Ping, Ni Y, Wu F F. Decentralized approach for congestion management and congestion price discovering[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(6): 645-652.
- [10] McCalley J, Vittal V, Abi-Samra N. An overview of risk based security assessment[C]// IEEE Power Engineering Society 1999 Summer Meeting. Alberta, Canada: IEEE, 1999: 173-178
- [11] Yu Zuwei, Nderitu G, Smardo F. A proposed LOSBE as a generation reliability index for deregulated electricity markets[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Ohio, USA: IEEE, 2000: 1820-1824.
- [12] IEEE. Reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.
- [13] 麻常辉, 梁军, 杨永军, 等. 基于蒙特卡罗模拟法的输电网灵活规划[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 99-102.
Ma Changhui, Liang Jun, Yang Yongjun, et al. Monte carlo simulation based flexible planning of power transmission network[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 99-102(in Chinese).
- [14] 杨高峰, 康重庆, 谷兴凯, 等. 电力市场中基于情景分析的电网规划方案适应性评估[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 64-70.
Yang Gaofeng, Kang Chongqing, Gu Xingkai, et al. Scenario analysis based flexibility evaluation of power grid planning under deregulation[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 64-70(in Chinese).
- [15] 张国华, 张建华, 彭谦, 等. 电网安全评价的指标体系与方法[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 30-34.
Zhang Guohua, Zhang Jianhua, Peng Qian, et al. Index system and methods for power grid security assessment[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 30-34(in Chinese).



韩如月

收稿日期: 2011-04-12。

作者简介:

韩如月(1979), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统可靠性、电力市场, E-mail: hanry1979@163.com;

万秋兰(1950), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统可靠性、电力市场等。

(责任编辑 褚晓杰)