

配电网供电能力研究综述

郭焱林, 刘俊勇, 魏震波, 许立雄, 向 月, 孙晓艳

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对配电网供电能力(LSC)、转供能力(NTSC)及最大供电能力(TSC)研究间关联性强及研究内容边界界定模糊等问题,在归纳总结相关研究成果的基础上,对三者之间的相关性进行深入剖析,指出隶属于经济性、动态性及安全性研究范畴的三者存在交叉,但各自表征物理意义上有明显差异,构建综合性供电能力指标体系是关键。结合当前趋势,对面向配电网分布式发电、储能和电力电子技术发展、一二次系统融合以及市场环境变革的供电能力研究进行展望。

关键词: 配电网; 供电能力; 最大供电能力; 转供能力

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.005

0 引言

由于我国大城市群发展规律与国外不同,经历过快速增长时期的城市建设逐渐放缓,新建骨干电网的需求降低,加之城市用地紧张,新建输变电走廊难度加大,因此在可增加联络通道的前提下,如何利用现有网络资源提升配电网的供电能力 LSC (Load Supply Capability)成为研究热点。作为兼顾系统经济性与可靠性的综合性指标,供电能力是电网运行与规划的重要参考。传统供电能力概念是指受到电压降极限、热极限和稳定极限约束的输电网最大输电能力 TTC(Total Transfer Capability)^[1-2]。然而,在配电网中并不存在因负荷功率不平衡导致的稳定极限问题。因此,配电网供电能力应是在满足电压降极限和热极限条件下的最大负载能力。

早期配电网供电能力研究以变电容量评估为主,如容载比法^[2]。这种方法在负荷快速增长的阶段得到广泛应用,但仅以变电容量为参考依据,没有考虑网络之间的协调配合,系统经济性和可靠性得不到保障。因此,有学者提出了在满足系统运行约束下的最大负荷承载能力^[3]的概念,旨在从经济性的角度评估网络所能支撑的最大负荷;以及通过最大负荷倍数^[4]评价当前网络运行供电安全裕度的反向思路。例如,文献[5]以网络能承受的最大负荷为目标,采用直流潮流方程处理功率约束条件,并用线性规划法进行求解。由于该文献没有考虑负荷的增长模式,且认为所有负荷互为独立,因此其结果存在一定的偏差。文献[6]则以重复潮流 RPF(Repeated Power Flow)算法分别对单点、分区、网络的供电能

力进行评估。其中,对评估区域内负荷采取相同增长模式,而对评估区域外负荷采取恒定不变的处理方式,缺乏合理的解释。

也有学者提出考虑故障情况下的供电可靠性^[7-10],即故障情况下通过网络转移能够恢复供电的负荷大小——故障恢复问题;并提出了包括启发式搜索方法^[7]、多代理技术^[8]、Tabu 搜索算法^[11]等在内的优化算法进行求解。但依然存在因安全经济运行约束而不能恢复所有负荷供电的问题。因此,文献[12-13]在计及静态安全准则下,假设所有负荷均能通过主变联络通道和馈线联络恢复供电,提出了最大供电能力 TSC(Total Supply Capability)的概念与相应的定义、指标体系和求解方法。

上述文献仅从经济性和可靠性的角度对配电网供电能力进行研究,仍存在角度单一、部分概念模糊或不统一、缺乏系统性框架研究与范畴总结的问题。具体如下:以重复潮流算法为代表的经济性评估能否满足故障情况下重要负荷的供电可靠性?以 TSC 为代表的经济性评估能否满足系统正常运行的经济性?在同时考虑经济性和安全性的基础上,如何协调负荷转移能力、TSC 与供电能力?这些问题仍然缺乏科学论证支持或详实的解释。

针对上述问题,本文将做出以下工作:首先,对配电网供电能力相关研究成果进行梳理,对以经济性为主的供电能力、计及网络动态过程的转供能力 NTSC(Network Transfer Supply Capability)以及基于 $N-1$ 安全约束的 TSC 进行归纳总结;然后,对这三者关联关系进行解析,明确所属范畴,并指出当前研究存在的问题;最后,结合配电网当前发展趋势,给出未来供电能力研究的主要方向与思路,以期对配电网运行与规划研究提供参考。

1 供电能力研究概述

如图 1 所示,现有供电能力研究可以从研究内

收稿日期: 2017-02-15; 修回日期: 2017-10-31

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2014AA-051901)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2014-AA051901)

TR(Trust Region)方法^[24]等求解方法。文献[3]对负荷增长过程中的电压和电流进行监视,并以并联电容器对电压进行优化控制,提升供电能力。实际上,在辐射状的配电网运行方式下,主变变比改变和网络重构^[15]也能较大地影响该区域电压。在负荷的时序增长过程中如何考虑这三者的动态行为对供电能力的影响是值得关注的。

另外,考虑负荷增长过程中的复杂时空耦合关系也十分必要。不同类型负荷的时空分布特性(如季节性负荷、节假日负荷等)不一致^[16,25],会导致点与点之间、分区与分区之间的负载均衡度不同。采用整个区域负荷以相同比例系数增长的方式,不能准确地反映负荷增长的时序特性以及可能带来的供电瓶颈。即需要对网络、区域及单点多层级供电能力进行评估^[4]。值得注意的是,单个区域和单点的负荷增长模式与相邻区域或节点的负荷增长具有相关性。文献[4]将所有非研究区域负荷视为不变,这样很难挖掘出实际供电瓶颈^[26],也很难给出所有节点或区域的供电裕度。文献[27]以经济学中的价值函数对不同负荷的增长模式进行模拟,得到各单元的供电裕度和供电瓶颈,模型精细化程度和准确性进一步得到提高。

将以上影响供电能力的因素及其量化分析方法进行总结,如图 2 所示。

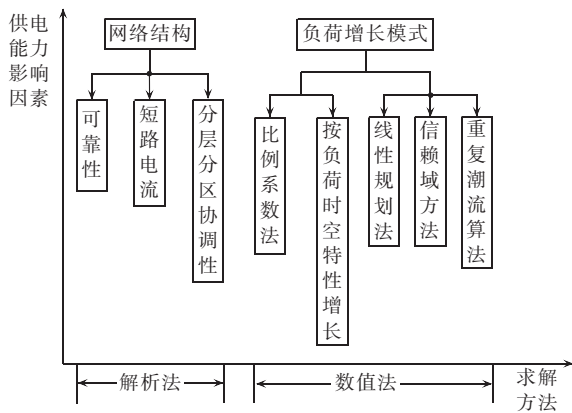


图 2 供电能力研究内容和方法架构图

Fig.2 Schematic diagram of research contents and methods on LSC

3 计及网络动态过程的配电网转供能力研究

在网络拓扑结构改变的动态过程中,负荷转移必须要满足转带馈线和变电站不过载的热极限约束,在此基础上实现更大的负荷承载能力。即在转供的动态过程中,安全性成为转供能力更为关注的约束准则。

3.1 以安全性为主的配电网转供能力研究

以安全性为主的配电网转供能力研究,旨在保障网络安全性的情况下尽可能多地恢复失电负荷,即故障恢复问题。在故障恢复的研究中,模型一

般以有功损耗最小、开关动作次数最小、恢复负荷最大、负荷均衡以及电压质量等为目标函数,约束条件往往考虑辐射状约束、电压约束、电流约束以及功率平衡约束等^[28]。在对配电网转供能力或者故障恢复能力进行分析时,应对网络复杂度不同的中、高压配电网进行区别研究。中压配电网接线更为复杂、拓扑变化方式多样,而这种多变的拓扑方式又难以用枚举法进行求解^[29],因此研究重点在于采用更为高效的优化算法得到转供能力。而对于弱电磁环网结构的高压配电网而言,接线模式相对简单,研究负荷转供能力主要集中在主变电站间转移通道的一次、二次转供问题^[30]和馈线联络问题。

3.1.1 中压配电网转供能力研究

中压配电网故障恢复指的是在馈线出口下游故障定位和隔离之后,实现非故障停电区域的最大负荷恢复供应。因为中压配电网接线方式复杂,尤其是馈线出口网络交错纵横,在故障恢复中又要保证最大的负荷恢复、最少的开关动作次数,这是属于非确定性多项式困难 NP - hard (Non - deterministic Polynomial hard)问题中的多目标组合优化问题^[31]。目前研究集中在如何更加高效地求解得到最优解,出现了数学优化方法、启发式方法和人工智能算法。文献[29,31]对这 3 种方法的使用范围、求解效率等方面进行了相应的阐述。其中,基于群体智能算法的故障恢复得到广泛的关注和研究^[11,32-34]。但是在群体智能算法的研究中,初始种群产生、进化过程中不可行解的修复^[35-36]以及如何进行算法融合^[37]等方面,需要进行更深入的实用化研究。

3.1.2 高压配电网转供能力研究

高压配电网的故障分为主变故障和馈线出口故障^[38],这里馈线出口故障意味着整条馈线所带负荷均会失电,而对中压配电网进行转供能力分析时,馈线出口下游故障并不会引起所有负荷失电。即在对高压配电网进行转供能力分析时,仅需要以馈线出口故障作为馈线故障方式。

在高压配电网的转供能力研究中,首先需要典型 110 kV 配电网接线模式的可靠性^[39]、经济性以及转供能力等方面进行论证分析^[15],文献[15]发现制约主变电站间转带的是站间联络通道和负荷均衡^[40]要求。其次,则是对网络结构进行简化分析,虽然相较于中压配电网而言高压配电网结构较为简单,但也存在网络规模较大导致算法搜索效率太低的问题。因此,文献[41]提出以基于公共信息模型(CIM)的拓扑收缩方法简化网络,提高算法的搜索效率。

3.2 考虑经济性的配电网转供能力研究

在配电网正常运行状态下,网络重构通过开关

动作来优化潮流分布,达到均衡负荷分布、降低网损、提升电压质量等经济安全运行的目的,同时也可提高网络的供电能力^[42-43]。在负荷转移的过程中,不仅需要考虑到负荷水平及其增长模式,而且还需要考虑网络能够提供的负荷转带路径。

负荷因其时间分布、空间分布以及负荷类型的复杂关联性,在负荷的增长过程中会形成不同的供电瓶颈^[27]。前文中提到的基于重复潮流算法的供电能力评估方式认为,在负荷增长过程中(不考虑重构等措施)一旦出现网络状态量越限,则达到了该网络极限。实际上,负荷水平、增长模式和负荷类型差异给供电能力带来的不利影响,可以通过网络重构进行部分消除^[14,42]。因此,研究网络重构在给系统经济性、可靠性、电压质量带来好处的同时,对供电能力的影响也应该计及。

网络重构的关键是如何确定最优的联络开关组合方式。联络开关受限于开断过程的暂态特性,其动作次数有限,文献[44]从提高系统可靠性和降低网损的角度提出开关的改造升级方案。文献[45]则提出以操作更为灵活、可控性更强的智能软开关,与传统的联络开关共同进行配电网的时序优化。显然,联络开关的时序动作行为与负荷曲线联系十分紧密。负荷的增长一般而言是平缓渐进的,加之负荷预测技术的愈发成熟,可以采用时段划分^[46-47]的方式,在计及开关动作次数的情况下实现对供电能力的计算。

4 基于 $N-1$ 安全约束的配电网 TSC

4.1 TSC 概念

在第 2 节介绍的供电能力范畴下实现的负荷分布,很难在故障情况下实现负荷的安全转移,尤其是在配电网安全校验中很重要的 $N-1$ 校核不一定得到保障。因此在计及静态安全约束的基础上,评估现有网络的供电能力就显得十分重要,TSC 的概念^[12-13]应运而生。

TSC 是指一定供电区域内所有设备均满足 $N-1$ 安全约束条件下的最大负荷供应能力。TSC 的大小取决于变电站的负载能力和网络的转供能力^[12]。相关学者对 TSC 模型的建立^[38,48]和完善^[30,49-51]、指标簇定义^[13]、求解方法^[52-53]等基础理论方面进行了大量的研究工作。其中基于馈线互联关系的 TSC 模型^[38]因其精确性和可操作性得到了广泛的应用,该模型以馈线负荷为控制变量、主变负载率为状态变量,以 $N-1$ 约束和容量约束作为约束条件,考虑在负荷转移过程中的馈线联络和主变联络、负荷均衡度等因素,最终形成以最大负荷承载能力为目标函数的线性规划问题。

4.2 TSC 模型

虽然 TSC 在配电网规划和优化运行方面展现了良好的应用前景^[54-55],但是在应用前应该给出该模型的基础性理论分析,主要包括模型的合理性和最优解的性质等。TSC 模型的合理性指的是模型中所考虑的约束是否与实际运行规划符合。该模型最重要的约束就是 $N-1$ 约束,文献[56]对所得最优解能否通过 $N-1$ 安全校验进行了论证分析,并提出负荷未细分到馈线上是出现误差的主要原因。因此,文献[47]提出基于馈线互联关系的 TSC 模型,并与 $N-1$ 校验进行对比,得出该模型是满足 $N-1$ 约束的结论。但在基于馈线互联和主变互联的模型中,均没有在短时过载的基础上考虑主变二次转供问题。

与此同时,在基于负荷分布均匀、供电半径短的假设之上,负荷转移过程中网损和电压约束在该模型中并未考虑,但网损和电压约束对 TSC 的影响在实际运行中往往是不能忽略的^[53,57]。计及潮流计算的 TSC 模型虽然复杂,但选取更为成熟、精确的算法^[52]不失为一种较好的方式。另外,基于馈线互联关系的 TSC 模型最优解是否是符合电网约束的唯一解,对于电网规划有着重要的意义。文献[58]对 TSC 存在无解和唯一解条件下的数学表达式进行论证分析,得出实际电网 TSC 模型总是存在多解的结论。在这一系列的 TSC 模型理论研究的基础上,大量文献对 TSC 在配电网运行和规划中的应用进行相应的研究^[51,59-60]。

4.3 基于 TSC 模型的配电网优化规划

影响 TSC 的因素中最重要的是网架结构和联络通道。网架结构决定了在 $N-1$ 条件下负荷转移能力的基础^[15,61],文献[61]对典型的 π 型接线、直供接线、T 型接线方式的 TSC 进行分析,推荐 π 型接线为城市配电网的远景规划方式。此外,主变电站间的联络通道结构^[62]、联络线路容量^[63]以及联络通道容量与主变容量的匹配^[60]等方面对高压转供能力的影响也是不容忽视的。

配电网联络不仅包含主变电站间联络通道,还包括馈线联络线。馈线联络线为馈线之间的负荷转移提供路径,而中压配电网馈线之间存在若干的联络线,这些联络线对 TSC 的有效性在文献[64]中有详尽的阐述。虽然对高压配电网和中压配电网的转供进行单独分析,但也存在 2 个不同电压等级联络和主变容量匹配的问题^[60]。

5 存在问题及思考

从前文分析可以看出,以经济性为主的供电能力、计及网络动态过程的转供能力与基于 $N-1$ 安全约束的 TSC,三者 in 研究内容上有较强相关性,并且也

存在研究内容相互交叉的地方。因此,有必要对三者关系进行重新梳理与总结,并指出当前研究的不足。

5.1 三者关联性剖析

图 3 圆形区域 I、II、III 分别代表配电网安全分析、供电能力和转供能力。配电网安全分析以 $K(N-1+1)$ 准则^[65]来刻画故障的严重程度和安全性的强弱,主要针对配电网静态安全性进行分析;第 2 节介绍的供电能力从网络正常情况下资源利用最大化的角度进行评估,隶属于配电网经济性研究的范畴;转供能力则从网络结构变化的动态过程对供电经济性和安全性的影响出发对供电能力进行研究。而由圆形区域 I、II、III 重叠的阴影部分,代表的是兼顾网络安全分析、经济性分析与动态分析的最大可承担负荷能力的研究,即 TSC。可以看出,安全分析作为供电能力、转供能力和 TSC 之间的纽带,将三者联系起来相互影响。

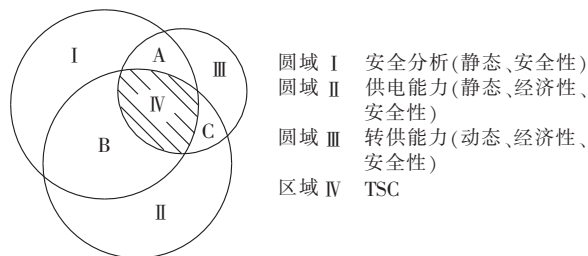


图 3 供电能力、转供能力和 TSC 三者关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of relationship among LSC, NTSC and TSC

圆形区域 I、III 重叠部分中,区域 A 代表的是在计及网络安全约束下的转供能力研究,也就是第 3.2 节所介绍的以安全性为主的转供能力的范畴。由圆形区域 I、II 重叠的区域 B 则是从静态安全性和经济性的角度出发评估供电能力,这是属于第 2 节介绍的供电能力中以变电站短路电流校验的变电单元供电能力。而由圆形区域 II、III 重叠的区域 C 是考虑网络在正常情况下结构改变的动态过程对供电能力的影响,这也就是第 3.2 节介绍的以经济性为主的转供能力。

圆形区域剩余部分:圆形区域 I 剩余部分即不规则区域(区域 I-(区域 IV+区域 A+区域 B))表示不考虑经济性和动态过程的传统配电网安全性分析;圆形区域 II 剩余部分(区域 II-(区域 IV+区域 B+区域 C))表示不考虑网络结构变化和安全性,也就是以重复潮流算法为代表的供电能力研究;圆形区域 III 剩余部分则表示仅以网络转供能力为目标的动态过程研究,不计及网络安全性和经济性,目前这类研究在配电网中鲜有报道,同时在工程上的应用价值并不明显。

5.2 当前研究存在的不足

由前文现状分析可以看出,虽已有不少文献对供电能力、转供能力和 TSC 进行相关研究,但问题也暴露不少,总结如下。

a. 影响因素方面。

在负荷增长模式研究中,电网调度人员可以通过调节主变档位、投切电容器以及网络重构等方式,提高网络运行的安全裕度和供电能力。但在这些调控手段协同作用时,如何确定最优的组合动作顺序在目前研究中还没有定论。

b. 评估模型方面。

第 2 节介绍的供电能力实质上是评估电网经济性,在达到网络最大负荷承载能力的情况下,重要元件的 $N-1$ 安全校验不一定能够得到满足。与之相反,在满足所有元件 $N-1$ 校验均能通过的情况下,TSC 在系统正常运行时提供很大的安全裕度,其经济性又得不到保障。因此,提出一个综合考虑可靠性和经济性的供电能力定义及求解模型是下一步研究的重点。

c. 工程应用方面。

TSC 是在满足所有设备均通过 $N-1$ 校验的情况下所确定的负荷分布。为追求电网所有元件 $N-1$ 校验均能通过,每条馈线所能承担的负荷就会相对保守。尤其是考虑负荷分级的情况下,为了满足可靠性要求不高的用户的不间断持续供电,电网需要投入更多的资本,因此经济性很难得到保障。

其次,在基于馈线互联关系和主变互联关系的 TSC 模型中,最优解很可能出现某些馈线负荷为 0 的情况,这与实际工程是不相符合的。即使在建立模型时采用基于负荷均衡度的模型,达到计及安全准则下的最大负荷承载能力,对于实际电网而言,能否达到此种负荷最优分布还并未有合理的论证。并且为了达到最优负荷分布,电网需要进行的投资以及取得多大收益也并没有相应的分析论证。

再者,供电瓶颈是指在电网正常运行或者故障情况下制约电网安全的关键线路。但是到目前为止,也还未确定一种符合工程实践的负荷增长方式。而在 TSC 中,所有 $N-1$ 校验均能通过,即在 $N-1$ 故障情况下是不会存在供电瓶颈的;但是在电网正常运行中,考虑到负荷不断变化,这时 TSC 没有办法给出供电瓶颈和相应的电网改造升级措施。

6 研究展望

随着以 DG^[42,65]、ESS^[66]、电动汽车(EV)^[58,67-68]为代表的配电网新型“源、荷”形式的发展,以高级量测平台体系和态势感知技术为基石的信息物理系统概念的提出,以及以需求响应(DR)^[69]、辅助服务为代

表的电力市场深化改革,即新元素、新技术、新机制会从根本上改变传统物理意义上的配电网络,供电能力研究必须与时俱进。

6.1 新元素

在新型“源、荷”形式的发展下,配电网潮流和电压分布发生根本性变化,因此,基于主动管理策略^[70]的主动配电系统^[71]应运而生。与此同时,静止无功补偿器(SVC)、配电静止同步补偿器(DSTATCOM)、统一潮流控制器(UPFC)为代表的电力电子化装置,以其调节速度快、调节范围广的特点,作为新的控制手段,从根本上改变了配电网的功率电压管控。因此,为适应配电网源荷技术和功率控制技术的发展,供电能力应从主动元素特性、电力电子化配电网、面向消纳新能源的主动调控方案以及相应的电网规划等方面进行研究。

a. 主动元素特性。

作为新型电源形式的 DG,在系统正常运行下能够提供一定的负载能力,本质上提高了网络的供电能力。而在故障情况下,不同类型和容量的 DG 在负荷转移过程中所扮演的角色不同^[72-73],需要对 DG 在电网不同运行状态下的特性进行深入研究。虽然文献[25, 30, 42, 72]对含不同类型 DG 的配电网供电能力、TSC 进行讨论分析,但是在进行供电能力评估时如何考虑 DG 不确定性却鲜有报道。

其次,ESS 和 EV 的集中大规模或者分散小容量的接入方式,也会显著地影响电网运行状态。ESS 和 EV 集中大规模充电方式可能会加剧配电网的峰谷差,形成新的供电瓶颈,降低电网的供电能力;而分散小容量充电方式改变了负荷增长模式,直接对供电能力产生影响,而在网络故障情形下,ESS 集中大规模的放电方式能够向更多负荷提供转移通道,恢复供电。可见,在面向提升配电网供电能力时,应该对 ESS^[74]和 EV^[75]在不同网络运行状态下的角色和作用^[76]进行深入分析,以便指导相应的充电桩规划。

可以看出,这些新元素在负荷转移过程中的作用,以及新元素自身的供电需求对供电能力的影响,在下一步研究中应该深入讨论。

b. 电力电子化配电网。

随着电力电子技术的飞速发展,电力电子装置在配电网“源、网、荷”中已有不同的应用,尤其是固态开关、直流变压器、UPFC 的应用^[77-78]会改变配电网供电格局。首先,通过加载电力电子化装置可以改变线路的热极限约束^[79-80],从根本上改变网络的供电能力;其次,固态开关等控制器提供快速、优越的控制能力,能够实现配电网负荷二次乃至三次转带的可能,从性能上改变配电网的转供能力,因此,对于面向电力电子化配电网的供电能力研究,亟需一套更

加完整的指标体系以及相应的规划理论。

c. 主动调控方案。

新型“源、荷”的接入在带来巨大社会效益的同时,也带来了强烈的不确定性和时空耦合特性。这些不确定性元素很可能造成电网峰谷差的进一步加剧,造成 DG 消纳不足、负荷供应紧张的局面,因此,进行面向系统正常运行时的供电能力研究时,首先研究如何利用各元素间的互补作用消除不确定性,如风火打捆、风光储互补、风光水互补等;然后是加强 DG、EV 和负荷的日前预测技术,制定相应的日前调度运行方案,并通过实时滚动修正方案消除由不确定性带来的供电瓶颈,提升电网供电能力。同时,供电能力也演变成不确定性的指标,因此,利用该指标评估各种运行状况下的供电充裕度和供电瓶颈,是下一步研究的关键点之一。

d. 电网规划。

我国电网发展水平不一致,表现为城市电网基础夯实而农村电网结构薄弱的局面。而 DG 和 EV 等主动元素因物理条件而在不同地区电网接入,主要表现为农村电网可利用范围广、新建 DG 输电通道较容易,而城市电网相对成熟,新建 DG 场站投资昂贵,新建 EV 充电桩反而更能适应经济更为发达的城市电网需求。

对于供电能力研究而言,城市配电网规划应该面向如何充分利用大规模或者分散小容量 EV 接入,消除供电瓶颈,提高系统正常运行时的供电能力和故障时的转供能力。而农村电网供电能力研究应着重于 DG 容量外送通道的建立,以及联络通道和网架结构夯实,提高农业用电的供电可靠性。

6.2 新技术

随着以广域测量系统(WAMS)和相量测量单元(PMU)为代表的高级量测技术和态势感知技术的发展,电力一二次系统信息的融合逐渐成为趋势,电网信息物理系统^[81-82]CPS(Cyber Physical System)的概念也随之提出。电网 CPS 强调以二次信息系统提高一次物理系统的可观测性,使得电网调度人员对电网运行状态和运行边界有着更为清晰的认识,并通过二次信息系统控制电网的继电保护系统、配电自动化系统、自动发电控制(AGC)系统等,提高电力一次物理系统的可控性。

对于供电能力研究,需首先刻画出二次信息系统的可靠性对电网观测性的影响,即量化二次信息系统的可靠性能够造成电网调度人员对运行边界和运行状态的误判,进而造成设备开关的误动作和电网运行方式的改变。在此基础上,才能进一步研究信息系统可靠性对供电能力的影响。

6.3 新机制

随着电力市场改革的深入,配售分离是趋势。对供电能力研究而言,以下2个方面会对其产生影响:一是市场机制的改变,在电力市场开展下不同的配售电价机制改变引导用户的用电行为,即DR^[83],从而改变用户的供电路径及潮流分布,即电价机制影响的是负荷形态及其增长模式;二是独立辅助服务提供商的影响,辅助服务市场中备用容量子市场和电压/无功支持子市场,主要是消除配电网的电力电量不平衡(包括合同电量与实时电量不平衡和故障情况),提供短时的电力供应,必然会影响网络的动态供电能力及转供能力。

总体而言,“三新”的出现势必会对配电网供电能力产生直接影响。但主动元素和电力电子化设备的接入,会从根本上改变配电网的供电能力;而CPS和电力市场新机制的形成,则影响相对较小。

7 结论

本文在全面梳理供电能力、转供能力和TSC等研究的基础上,着重从研究范畴、分析方法、影响因素及工程实用性等方面进行了剖析,主要结论如下。

a. 系统性研究框架缺失、研究角度单一、影响因素及其量化评估模型合理性有待检验,及实际工程应用性差等问题仍是当前供电能力相关研究的主要瓶颈。

b. 供电能力、转供能力与TSC三者虽各自研究范畴与定义有所不同,但存在交叉,安全性分析是其间“桥梁”。在具体应用时,应根据实际问题进行区别选择。

c. DG、ESS、EV等主动元素接入与电力电子化配电网的发展,会根本上改变供电能力的研究形态,适时改变传统指标体系与评估模型及形成有效的主动控制策略等是未来配电网供电能力研究的重点。

d. 电网CPS和电力市场改革对供电能力影响并不能显性刻画,在一定范围内影响供电路径选择和供电可靠性,在后续研究中需要关注。

参考文献:

- [1] RODRIGUES A, SILVA M. Probabilistic assessment of available transfer capability based on Monte Carlo method with sequential simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 484-492.
- [2] 李欣然, 刘友强, 朱湘友, 等. 地区中压配电网容载比的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34(7): 47-50.
LI Xinran, LIU Youqiang, ZHU Xiangyou, et al. Research on capacity-load ratio in district MV distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2006, 34(7): 47-50.
- [3] MIU K N, CHIANG H D. Electric distribution system load capability: problem formulation, solution algorithm, and numerical results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 436-442.
- [4] 汪卫华. 现有配电模式下配网供电能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(14): 13-16.
WANG Weihua. Research on supply capability of distribution network under present distribution mode[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(14): 13-16.
- [5] 邱丽萍, 范明天. 城市电网最大供电能力评价算法[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 68-71.
QIU Liping, FAN Mingtian. A new algorithm to evaluate maximum power supply capability of urban distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 68-71.
- [6] 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.
- [7] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 251-257.
ZANG Tianlei, ZHONG Jiachen, HE Zhengyou, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 251-257.
- [8] 杨丽君, 刘建超, 曹良品, 等. 基于黑板模型的配电网故障恢复多代理协作机制设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 85-89.
YANG Lijun, LIU Jianchao, CAO Liangjing, et al. Multi-agent coordinated mechanism design of distribution network fault restoration based on blackboard model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 85-89.
- [9] 张海波, 张晓云, 陶文伟. 基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 103-108.
ZHANG Haibo, ZHANG Xiaoyun, TAO Wenwei. A breadth-first search based service restoration algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 103-108.
- [10] 周晓宁, 徐伟, 胥传普, 等. 计及负荷转供措施的电网设备过载辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 61-66.
ZHOU Xiaoning, XU Wei, XU Chuanpu, et al. The assistant decision-making for power grid equipment overloading considering load transfer actions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 61-66.
- [11] 李海峰, 张尧, 钱国基, 等. 配电网故障恢复重构算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34-37.
LI Haifeng, ZHANG Yao, QIAN Guoji, et al. Study on the algorithm for service restoration reconfiguration in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 34-37.
- [12] LUO Fengzhang, WANG Chengshan, XIAO Jun, et al. Rapid evaluation method for power supply capability of urban distribution system based on N-1 contingency analysis of main-transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(10): 1063-1068.
- [13] XIAO Jun, LI Fangxing, GU Wenzhuo, et al. Total supply capability and its extended indices for distribution systems: definition, model calculation and applications[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 869-876.

- [14] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等. 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略[J]. 电工技术学报,2014,29(12):137-147.
JIN Xiaolong,MU Yunfei,JIA Hongjie,et al. An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(12):137-147.
- [15] 程一鸣,赵志辉,王天华. 城市110 kV高压配电网接线方式研究[J]. 电网技术,2008,32(2):113-115.
CHENG Yiming,ZHAO Zhihui,WANG Tianhua. Research on connection mode of civil 110 kV distribution network[J]. Power System Technology,2008,32(2):113-115.
- [16] 吴振辉,彭晓涛,沈阳武,等. 一种配电网环型供电模型及其合环运行方式的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):57-63.
WU Zhenhui,PENG Xiaotao,SHEN Yangwu,et al. Study on a loop power supply model and its loop-close operation mode for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(10):57-63.
- [17] 刘健,殷强,张志华. 配电网分层供电能力评估与分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(5):44-49.
LIU Jian,YIN Qiang,ZHANG Zhihua. Evaluation and analysis of hierarchical total supply capability for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(5):44-49.
- [18] 姚福生,杨江,王天华. 中压配电网不同接线模式下的供电能力[J]. 电网技术,2008,32(2):93-95.
YAO Fusheng,YANG Jiang,WANG Tianhua. Power supply capacity of mid-voltage distribution networks under different connection modes[J]. Power System Technology,2008,32(2):93-95.
- [19] VENKATESH B,RANJAN R,GOOI H B. Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(1):260-266.
- [20] 葛少云,董静媛,王晓东,等. 基于模糊推理的城市中压配电网供电能力评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2004,16(6):14-17.
GE Shaoyun,DONG Jingyuan,WANG Xiaodong,et al. Evaluation of power supply capability in MV distribution networks based on fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSU-EPAS,2004,16(6):14-17.
- [21] 黄伟,张建华,戴博,等. 模糊算法在配电网供电能力评估中的应用[J]. 中国电力,2005,38(2):70-73.
HUANG Wei,ZHANG Jianhua,DAI Bo,et al. Application of fuzzy method in supply capability evaluation of distribution networks[J]. Electric Power,2005,38(2):70-73.
- [22] 杨明海,刘洪,王成山,等. 中压配电系统供电模型研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2011,47(4):382-386.
YANG Minghai,LIU Hong,WANG Chengshan,et al. Power supply model of medium voltage distribution system[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science),2011,47(4):382-386.
- [23] 葛少云,何文涛,刘洪,等. 中压配电系统供电模型综合评价[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(13):104-109.
GE Shaoyun,HE Wentao,LIU Hong,et al. Comprehensive evaluation of power supply model of medium voltage distribution system[J]. Power System Protection and Control,2012,40(13):104-109.
- [24] 胡尊张,艾欣. 配电网供电能力计算研究[J]. 现代电力,2006,23(3):16-20.
HU Zunzhang,AI Xin. Study on the load supply capability computation of distribute network[J]. Modern Electric Power,2006,23(3):16-20.
- [25] 张嘉堃,韦钢,朱兰,等. 基于盲数模型的含分布式电源配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化,2016,40(8):64-70.
ZHANG Jiakun,WEI Gang,ZHU Lan,et al. Blind-number model based power supply capability evaluation of distribution networks with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(8):64-70.
- [26] WANG Jie,WEN Fushuan,YANG Yan,et al. Assessment of load supply capability with power supply bottleneck discovery [C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Hangzhou,China:IET,2012:1-7.
- [27] 李力,李剑辉,高超,等. 包括供电瓶颈识别的电力系统供电能力评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(3):43-49.
LI Li,LI Jianhui,GAO Chao,et al. Assessment of load supply capability including identification of power supply bottleneck [J]. Proceedings of the CSU-EPAS,2013,25(3):43-49.
- [28] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2007:213-218.
- [29] 郭运城,卢炜,李明,等. 配电网故障恢复研究现状及展望[J]. 电力与能源,2014,35(3):321-324.
GUO Yuncheng,LU Wei,LI Ming,et al. Research status and prospect of distribution network restoration[J]. Power & Energy,2014,35(3):321-324.
- [30] ZHANG Shenxi,CHENG Haozhong,ZHANG Libo,et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):3215-3225.
- [31] 刘莉,陈学锋,翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(13):148-154.
LIU Li,CHEN Xuefeng,ZHAI Denghui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network[J]. Power System Protection and Control,2011,39(13):148-154.
- [32] 黄弦超,张粒子,Gareth TAYLOR. 考虑负荷控制的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):22-26.
HUANG Xianchao,ZHANG Lizi,Gareth TAYLOR. Service restoration of power distribution systems with load control[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(17):22-26.
- [33] 黄弦超. 含分布式电源的配电网故障恢复模型[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(19):52-57.
HUANG Xianchao. Model of service restoration of distribution systems with distributed generation[J]. Power System Protection and Control,2011,39(19):52-57.
- [34] 汤亚芳,陈曦,程浩忠. 基于协同进化算法的配电网故障阶段恢复策略[J]. 电网技术,2008,32(16):71-75.
TANG Yafang,CHEN Xi,CHENG Haozhong. A phased fault restoration algorithm for distribution system based on co-evolutionary algorithm of PSO and SA [J]. Power System Technology,2008,32(16):71-75.
- [35] 孙大雁,林济铿,袁龙,等. 配网负荷转供最优方案确定新方法[J]. 中国电力,2013,46(11):57-61.
SUN Dayan,LIN Jikeng,YUAN Long,et al. A new method for determining optimal load transfer scheme in distribution network[J]. Electric Power,2013,46(11):57-61.
- [36] 王薪苹,卫志农,孙国强,等. 计及分布式电源和负荷不确定性的多目标配网重构[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):116-121.

- WANG Xinping,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Multi-objective distribution network reconfiguration considering uncertainties of distributed generation and load[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):116-121.
- [37] 俞隽亚,王增平,孙洁,等. 基于支路交换-粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(13):95-99.
- YU Junya,WANG Zengping,SUN Jie,et al. Service restoration of distribution network based on the branch exchange-particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control,2014,42(13):95-99.
- [38] 肖峻,谷文卓,贡晓旭,等. 基于馈线互联关系的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):72-77.
- XIAO Jun,GU Wenzhuo,GONG Xiaoxu,et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(17):72-77.
- [39] 杨丽君,王伟利,卢志刚. 基于RPI值和多目标二进制BCC算法的配电网多故障恢复策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):99-102.
- YANG Lijun,WANG Weili,LU Zhigang. Multi-fault restoration based on RPI and BCC for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):99-102.
- [40] 庞清乐,高厚磊,李天友. 基于负荷均衡的智能配电网故障恢复[J]. 电网技术,2013,37(2):342-348.
- PANG Qingle,GAO Houlei,LI Tianyou. Load balancing based fault service restoration for smart distribution grid[J]. Power System Technology,2013,37(2):342-348.
- [41] 廖怀庆,刘东,黄玉辉,等. 基于公共信息模型拓扑收缩的配电网转供能力分析[J]. 电网技术,2012,36(6):51-55.
- LIAO Huaiqing,LIU Dong,HUANG Yuhui,et al. Analysis on transfer capability of distribution network based on CIM topological contraction[J]. Power System Technology,2012,36(6):51-55.
- [42] 廖怀庆,刘东,黄玉辉,等. 考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):9-16.
- LIAO Huaiqing,LIU Dong,HUANG Yuhui,et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy resources and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(16):9-16.
- [43] 王威,韩学山,王勇,等. 配电网重构及电容器投切综合优化方法[J]. 电网技术,2010,34(12):90-93.
- WANG Wei,HAN Xueshan,WANG Yong,et al. A composite optimization algorithm for distribution network reconfiguration and capacitor switching[J]. Power System Technology,2010,34(12):90-93.
- [44] GHOFrani J Z,KAZEMI M,EHSAN M. Distribution switches upgrade for loss reduction and reliability improvement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(2):684-692.
- [45] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2315-2321.
- WANG Chengshan,SONG Guanyu,LI Peng,et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and tie switch[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(9):2315-2321.
- [46] 李滨,韦化,李佩杰. 电力系统无功优化的内点非线性互补约束算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):53-58.
- LI Bin,WEI Hua,LI Peijie. Interior-point nonlinear algorithm with complementarity constraints for reactive-power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):53-58.
- [47] 颜伟,田甜,张海兵,等. 考虑相邻时段投切次数约束的动态无功优化启发式策略[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):71-75.
- YAN Wei,TIAN Tian,ZHANG Haibing,et al. Heuristic strategy for dynamic reactive power optimization incorporating action time constraints between adjacent time intervals[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(10):71-75.
- [48] 肖峻,谷文卓,郭晓丹,等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):47-52.
- XIAO Jun,GU Wenzhuo,GUO Xiaodan,et al. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(24):47-52.
- [49] 葛少云,韩俊,刘洪,等. 基于供电能力的主变电站间联络结构优化[J]. 电网技术,2012,36(8):129-135.
- GE Shaoyun,HAN Jun,LIU Hong,et al. Optimization of contact structure among main transformer stations in regional power network based on power supply capability[J]. Power System Technology,2012,36(8):129-135.
- [50] 刘洪,郭寅昌,葛少云,等. 配电系统供电能力的修正计算方法[J]. 电网技术,2012,36(3):217-222.
- LIU Hong,GUO Yinchang,GE Shaoyun,et al. A modified method to evaluate power supply capability of distribution system[J]. Power System Technology,2012,36(3):217-222.
- [51] 肖峻,李思岑,王丹. 计及用户分级与互动的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):19-25.
- XIAO Jun,LI Sicen,WANG Dan. Model of total supply capability for distribution network considering customer classification and interaction[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):19-25.
- [52] CHEN Kening,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. A method to evaluate total supply capability of distribution systems considering network reconfiguration and daily load curves[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(3):2096-2104.
- [53] 肖峻,刘世嵩,李振生,等. 基于潮流计算的配电网最大供电能力模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5516-5524.
- XIAO Jun,LIU Shisong,LI Zhensheng,et al. Model of total supply capability for distribution network based on power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(31):5516-5524.
- [54] 肖峻,张婷,张跃,等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):106-113.
- XIAO Jun,ZHANG Ting,ZHANG Yue,et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(10):106-113.
- [55] 肖峻,李振生,张跃. 基于最大供电能力的智能配电网规划与运行新思路[J]. 电力系统自动化,2012,36(13):8-14.
- XIAO Jun,LI Zhensheng,ZHANG Yue. A novel planning and operation mode for smart distribution networks based on total supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(13):8-14.
- [56] 肖峻,贡晓旭,王成山. 配电网最大供电能力与 $N-1$ 安全校验的对比验证[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):86-91.
- XIAO Jun,GONG Xiaoxu,WANG Chengshan. Comparative research between total supply capability and $N-1$ security

- verification for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 86-91.
- [57] 肖峻, 李振生, 刘世嵩, 等. 电压约束及网损对配电网最大供电能力计算的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 36-43.
- XIAO Jun, LI Zhensheng, LIU Shisong, et al. The impact of voltage constraints and losses on total supply capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 36-43.
- [58] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9.
- GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9.
- [59] 肖峻, 贺琪博, 白临泉, 等. 实现最大供电能力的配电网馈线与主变压器容量匹配[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 53-58.
- XIAO Jun, HE Qibo, BAI Linquan, et al. Optimal capacity ratio between feeders and main transformers to implement total supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 53-58.
- [60] DING Tao, LI Cheng, ZHAO Chaoyue, et al. Total supply capability considering distribution network reconfiguration under $N-k$ transformer contingency and the decomposition method[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 11(5): 1212-1222.
- [61] 葛少云, 郭寅昌, 刘洪, 等. 基于供电能力计算的高压配电网接线模式分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 405-411.
- GE Shaoyun, GUO Yinchang, LIU Hong, et al. Load supply capability based analysis of HV distribution network connection mode[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 405-411.
- [62] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 基于供电能力的主变电站联络结构优化[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 129-135.
- GE Shaoyun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Optimization of contact structure among main transformer stations in regional power network based on power supply capability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 129-135.
- [63] 葛少云, 郭寅昌, 刘洪. 基于供电能力分析的高压配电线路容量优化方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 768-775.
- GE Shaoyun, GUO Yinchang, LIU Hong. Capacity optimization of HV distribution lines based on load supply capability analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 768-775.
- [64] 肖峻, 郭晓丹, 王成山, 等. 基于供电能力的配电网联络有效性评价与化简方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 31-37.
- XIAO Jun, GUO Xiaodan, WANG Chengshan, et al. A TSC-based evaluation and simplification method on tie-lines of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 31-37.
- [65] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 45-51.
- ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generator in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 45-51.
- [66] 国宗, 韦钢, 郭运城, 等. 面向供电能力提升的配电网储能功率动态优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 1-8.
- GUO Zong, WEI Gang, GUO Yuncheng, et al. Dynamic optimization of energy storage power in distribution network based on power supply capacity[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 1-8.
- [67] KARFOPOULOS E, PANOURGIAS K, HATZIARGYRIOU N. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G regulation services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2834-2846.
- [68] KARFOPOULOS E, PANOURGIAS K, HATZIARGYRIOU N. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G regulation services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 329-338.
- [69] 李丹, 刘俊勇, 刘友波, 等. 风电接入后考虑抽蓄-需求响应的多场景联合安全经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 28-34.
- LI Dan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Joint secure & economic dispatch considering wind power, pumped storage and demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 28-34.
- [70] CURRIE R A F, AULT G W, FOOTE C E T, et al. Active power-flow management utilizing operating margins for the increased connection of distributed generation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2007, 1(1): 197-202.
- [71] 王守相, 葛磊蛟, 王凯. 智能配电系统的内涵及其关键技术[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 1-6.
- WANG Shouxiang, GE Leijiao, WANG Kai. Main contents and key technologies of smart distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 1-6.
- [72] 李振生. 智能电网背景下含分布式电源配电网的最大供电能力研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- LI Zhensheng. Study on total supply capability of distribution network with DG under the background of smart grid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [73] HIEN N C, MITHULANANTHAN N, BANSAL R. Location and sizing of distributed generation units for loadability enhancement in primary feeder[J]. IEEE Systems Journal, 2013, 7(4): 797-806.
- [74] 苏海锋, 梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 17-22.
- SU Haifeng, LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 17-22.
- [75] 杨秀菊, 白晓清, 李佩杰, 等. 电动汽车规模化接入配电网的充电优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 31-36.
- YANG Xiuju, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. Charging optimization of massive electric vehicles in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 31-36.
- [76] 苏海锋, 胡梦锦, 梁志瑞. 基于时序特性含储能装置的分布式电源规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 56-63.
- SU Haifeng, HU Mengjin, LIANG Zhirui. Distributed generation & energy storage planning based on timing characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 56-63.
- [77] 曹一家, 谭益, 黎灿兵, 等. 具有反向放电能力的电动汽车充电设施入网典型方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 48-52.
- CAO Yijia, TAN Yi, LI Canbing, et al. Typical schemes of electric vehicle charging infrastructure connected to grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 48-52.
- [78] 盛万兴, 段青, 孟晓丽, 等. 电力电子化进程下的交直流无缝混合灵活配电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1877-

1888.
SHENG Wanxing, DUAN Qing, MENG Xiaoli, et al. Research on the AC & DC seamless-hybrid fluent power distribution system following the power electronics evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1877-1888.
- [79] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [80] DOROSTJKAR-GHAMSARI M, FOTUHI-FIRUZABAD M, AMINIFAR F, et al. Optimal distributed static series compensator placement for enhancing power system loadability and reliability[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(11): 1043-1050.
- [81] ROMERO-RAMOS E, CÓMEZ-EXPÓSITO A, MARANO M A, et al. Assessing the loadability of active distribution networks in the presence of DC controllable links[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(11): 1105-1113.
- [82] BESSANI M, FANUCCHI R Z, DELBEM A, et al. Impact of operators' performance in the reliability of cyber-physical power distribution systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(11): 2640-2646.
- [83] LI Zhiyi, SHAHIDEHPOUR M, ALABDUWAHAB A, et al. Bilevel model for analyzing coordinated cyber-physical attacks on power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2260-2272.
- [84] 束洪春, 胡泽江, 刘宗兵. 城市电网最大供电能力在线评估方法及其应用[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 46-50.
SHU Hongchun, HU Zejiang, LIU Zongbing. Online evaluation of utmost power supply ability of urban power system and its application[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 46-50.
- [85] 李红军, 李敬如, 杨卫红. 基于信赖域法的城市电网供电能力充裕度评估[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 92-96.
LI Hongjun, LI Jingru, YANG Weihong. Assessment of urban power network power supply capability by trust region method[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 92-96.
- [86] 肖峻, 郭晓丹, 王成山, 等. 配电网最大供电能力模型解的性质[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 59-65.
XIAO Jun, GUO Xiaodan, WANG Chengshan, et al. Properties of total supply capability model solution for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 59-65.
- [87] 刘伟, 郭志忠. 配电网安全性指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 85-90.
LIU Wei, GUO Zhizhong. Research on security indices of distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 85-90.
- [88] WU Hongyu, SHAHIDEHPOUR M, ALABDUWAHAB A, et al. Demand response exchange in the stochastic day-ahead scheduling with variable renewable generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 516-525.

作者简介:



郭焱林

郭焱林(1992—),男,四川泸州人,硕士研究生,主要研究方向为配电网优化运行与规划(E-mail: SCUgyl@163.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士,主要研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、分布式发电及智能电网(E-mail: liujy@scu.edu.cn);

魏震波(1978—),男,四川成都人,副教授,博士后,通信作者,主要研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析与控制及电力市场(E-mail: weizhenbo@scu.edu.cn)。

Load supply capability of distribution network

GUO Yanlin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, XU Lixiong, XIANG Yue, SUN Xiaoyan
(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Since there exist strong relevance among the researches of LSC (Load Supply Capability), NTSC (Network Transfer Supply Capability) and TSC (Total Supply Capability) of distribution network, and the boundaries between the researches are vague, on the basis of the related researches. The correlation among LSC, NTSC and TSC is analyzed, which shows that the three belonging to the research category of economy, dynamic and security respectively, interact between each other, but have significant different physical meanings, so the aim is to construct comprehensive index system for LSC. Based on the current development trend, the LSC of distribution network considering the development of distribution generation, energy storage and power electronic technology, combination of primary and secondary systems, and change of market environment is analyzed.

Key words: distribution network; load supply capability; total supply capability; network transfer supply capability