第 40 卷 第 1 期 2016 年 1 月 10 日
DOI: 10.7500/AEPS20150330005
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.40 No.1 Jan.10,2016

主动配电网背景下无功电压控制方法综述

陈 旭,张勇军,黄向敏
(广东省绿色能源技术重点实验室,华南理工大学电力学院,广东省广州市 510640)

摘要: 为适应高渗透率、大规模分布式电源的接入,主动配电网成为当前及未来智能电网研究的趋势。文中综述了主动配电网背景下分布式电源接入、需求侧管理和拓扑结构等因素对配电网电压分布和电压稳定性的影响;从集中控制和分散控制两个方面总结了主动配电网的无功电压控制方法。结合当前研究现状的分析,总结了各种因素影响下主动配电网的无功电压控制研究中存在的一些问题和不足,指出了主动配电网无功电压控制研究中亟待解决的几个问题。

关键词: 分布式电源; 主动配电网; 无功功率; 电压; 需求侧管理

0 引言

目前,全球的能源压力和环境问题变得越来越突出。传统化石能源不可再生,未来将不可避免地逐渐枯竭,同时还产生"温室效应""酸雨""雾霾"等严重的环境问题。因此,寻找新型能源辅助甚至取代传统化石能源成为当前能源问题解决的突破口[1],由此而诞生的分布式电源(distributed generator,DG)技术,将成为清洁能源利用的主要形式和智能电网发展的重要方向。大规模 DG 接入配电网,可以提高清洁能源的比重,但其固有的间歇性、波动性和不确定性将影响配电网的运行,带来包括电能质量、电压控制及稳定性等问题[2]。

为适应高渗透率、大规模 DG 的接入,国内外学者正积极开展智能电网背景下的具有一定调节能力的主动配电网(active distribution network,ADN)技术研究[3-8]。国际大电网会议对于 ADN 的定义可以简单理解为:ADN 是一个内部具有 DG,拓扑结构可灵活调整,具有主动控制和运行能力的配电网[9]。具体而言,ADN 通过结合先进信息通信、电力电子及智能控制等技术,使得配电网中的 DG 具有可控性、网络拓扑可灵活调节、具有较为完善的可观性、能够实现协调优化管理的管控等功能[7-9]。

作为 ADN 运行的核心工作之一,ADN 通过跨电压等级的无功电压控制,在满足电力用户负荷需求的条件下,主动地对并网 DG、储能、有载调压变压器(on-load tap changer,OLTC)、无功补偿等设备的运行进行优化与控制,从而达到灵活控制系统供电电压,改善无功电压运行水平,降低设备电能损耗的目的[10]。然而,DG 出力的波动性、需求侧管理的加强和拓扑结构的主动调整使得配电网的无功电压特性变得复杂多变,因此,深入开展 ADN 的无功电压机理及适应其特性的控制策略研究,对于实现无功电压的主动控制,更好地接纳 DG,从而提高配电网的自动化和主动管理水平具有十分重要的意义[11]。

1 ADN 的无功电压特性研究

1.1 DG 对 ADN 的无功电压特性的影响

尽可能地消纳 DG、并对其进行主动控制是 ADN 的最显著特征,由于大量 DG 接入,因此 DG 将显著地影响配电网的特性。按照一次能源的来源可以把 DG 分为两类:一类是基于可再生能源的 DG(主要包括小水电、风电、光伏发电、生物发电等),另一类是基于化石燃料的 DG。其中后者的稳定性和可控性比较好,而前者(特别是风电和光伏)输出稳定性和可控性比较差[12]。DG 接入不仅改变了传统配电网能量单向流通的特性,更因采用电力电子变换器的连接使得配电网的无功电压特性无论是稳态还是暂态都发生了显著变化,对配电网无功电压控制带来了很大的挑战。

从稳态层面来说,小规模 DG 的接入会局部影响配电网的无功电压特性,而 ADN 的高渗透率 DG 接入却会影响配电网全局的无功电压特性[3]。DG 对配电网电压分布的影响程度与其出力、接入位置、接入模式、功率因数相关联[11,13-14]。在稳态运行中,

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-07-31。
国家自然科学基金资助项目(51377060)。

DG出力越大对配电网电压的支撑越明显，接入点越接近末端节点对线路电压分布的影响越大，滞后功率因数对电压的提升更明显。在相同渗透率下，DG分散接入比集中接入对电压的支撑作用更强。文献[15]认为配电系统电压的稳定性不仅取决于系统本身的构架，DG的接入位置、出力，甚至是风电机组的电气参数和机械构造都会对配电网静态电压稳定性产生影响。

从暂态的层面而言，当DG启停或者出力变化时，常常会造成系统电压波动。配电网中由于电阻、电抗大小相接近，传输的有功功率和无功功率变化都会对电压损耗产生很大的影响，而DG接入后潮流快速波动，引起线路上的无功损耗和电压损耗出现相应变化[1-5,16]；而且，不同类型DG的无功特性各有差别，有些是发出有功功率的同时消耗无功功率，有的则是产生无功功率，有的无功功率在一定范围中可控，有的按恒功率因数变化，等等。不同DG在实际运行中对配电网的无功电压特性影响也相应不同。

尽管DG有着众多的优势和巨大的经济效益，然而目前对DG不同的运行机理及其并网后对配电网无功电压的作用研究仍欠透彻[17-18]。要解决ADN的无功电压控制问题，必须先深入剖析不同类型的DG在不同渗透率、不同无功控制特性等条件下对配电网无功特性的影响机理，进而分析电压特性的相应变化。

1.2　可变拓扑对ADN的无功电压特性影响

区别于传统配电网的固定接线模式，ADN的网络拓扑结构可以根据实际运行需要进行灵活调整[3]。可变拓扑的实质是，在运行中通过网架结构的调整来改变网络中的潮流流向，以满足实际运行的需要。目前该技术多应用于带有储能系统的孤岛运行或带有DG的微网运行，涉及的研究主要是“并网—孤岛”模式切换的检测和控制[19-21]。

ADN中的可变拓扑属于增强配电网自愈功能的一种有效手段，其合理应用能减少停电损失和提高供电质量[22]。可变拓扑可以通过配电网的静态优化重构和故障恢复重构两种方式实现，通过操动联络开关和分段开关来优化网络结构，以负荷转移的方式改变潮流分布，实现优化配电运行方式和恢复非故障失电区域供电[23]。

在传统配电网中，功率传输单向流动，且网架结构基本维持不变，因此电压降落及无功功率流动的方向变化较为有限，能够比较有针对性地采取相应的稳压和无功平衡措施。而在ADN中，由于网架拓扑更加复杂，联络开关和接线开关也随运行的需要而作调整，再综合DG出力的间歇性和波动性因素，配电网的无功电压特性往往会产生跳变，故很难优化确定与之对应的补偿和控制措施。一旦选用的调节控制方法不当，不仅不能缓解电网运行的波动性，反而可能加剧电压越限和无功功率的不平衡性[24]。

富含DG的ADN的这种运行特性对其网架结构规划和调整提出了更高的要求，目前的研究往往忽略了DG本身的特性而将其当作一般电源进行规划和控制[25-26]，部分文献考虑了DG出力的随机特性，但对于如何在运行中兼顾无功电压控制需求来合理调整网架拓扑仍有待进一步研究。

1.3　需求侧响应对ADN的无功电压特性影响

随着阶梯电价的逐步实施以及电动汽车之类的新型负荷的逐步推广，配电网的需求侧管理越来越多地走入人们的视线，对负荷进行主动管理是ADN核心理念的又一重要组成部分[3]。

与传统按供电可靠性把负荷分为一级负荷、二级负荷和三级负荷的简单分类不同，ADN中还对负荷按调节能力进行区分[27]，如表1所示。

表1　ADN的负荷分类
Table 1　Load classification in ADN

负荷分类	调节能力
基本负荷	不能响应管理、没有调节能力的负荷
可断负荷	在必要时可根据配电网运行需要而切断的负荷
可调负荷	用电时间灵活、可在一定范围和周期内自由调整的负荷

从原理上来说，加强需求侧管理更有利于实现源荷平衡，减小配电网中的无功损耗和电压损耗。而从对配电网运行的影响角度，负荷调整又与DG接入有所不同，DG的出力随气候和时空分布因素变化的波动性更剧烈，突变性更强，相对而言可调负荷的变化幅度和速率较为缓和，可控性更好。

电动汽车行业日渐兴起，无论是对于公共的电动汽车站还是对于个人的私家电动汽车，其充电时间都具有一定的灵活性，可从协议供电和阶梯电价两方面入手，使其成为ADN中负荷响应的重要一环。当电动汽车规模化接入电网时，其无控制充电行为将会对电网造成冲击和扰动，而有序的充放电则有助于电网的经济运行[28]。由此，电动汽车入网(vehicle to grid，V2G)技术应时而生，即电动汽车忙时则充电，从电网获取电能，闲时则放电，接入反哺电网。V2G技术的产生和发展增强了电网对电动汽车的有序和有效管理，引导着需求侧主动管理

的进一步发展。也有学者在V2G的基础上提出了电池到电网(battery to grid,B2G)技术，大大拓宽了该领域研究的范畴[29]。显然，由于潮流的变化，V2G技术的应用对配电网无功电压特性同样带来了重要影响。协调电动汽车和储能等进行ADN的控制既有利于频率的控制[30]，也可以改善电压控制。

通过负荷调整可以进一步减小电网负荷的峰谷差，减少重载时在线路和变压器上的无功损耗，从而改善沿线的电压状况；此外，合理的负荷调整还可以减少电网的备用容量建设。但是，从系统运行人员的角度，由于已经习惯了从发电侧对运行进行管理，而负荷调整会增加调度控制的维度，使得“供电—用电”两侧更难协调；从用电客户的角度，他们习惯了传统的电价结算方式，对于实时电价或阶梯电价是否更有效节能尚持怀疑态度，因此在ADN中加强需求侧的主动管理还需要解决控制操作上的协调问题以及促进人们对这一领域的观念认知的转变[13]。

综合以上因素，ADN的无功电压特性变得更为复杂，具有范围广、变量多、维度高和变化频繁的特点，想要更好地消纳DG并对配电网进行有效的主动控制，必须要对多因素作用下的ADN无功电压特性作进一步的研究。

2　ADN无功电压控制

ADN中的DG只能在一定程度上改善配电网的电压水平，如果DG容量大、布点多，则也可能因倒送的功率太大而导致配电网电压过高。此外，由于可变拓扑增加了网架和潮流的复杂程度，需求侧响应增加了调度和控制中的变量和维度，因此在配电网中仅仅依靠DG的调节能力，还远远不能满足保持配电网的合理电压水平的需求，想解决配电网无功功率平衡的问题，仍然要协同多种设备进行控制，并结合网架和负荷调节等手段。

传统配电网无功优化方案中，影响无功优化结果的不确定因素大多数只有负荷的波动，而由于各种DG接入后机组的输出功率受天气和地域等随机波动的影响很大，ADN中的不确定因素增多。相比负荷变化，DG出力的变化更加频繁，因此使得含有大规模、高渗透率DG接入的ADN的无功电压控制问题变得更为复杂。

目前的研究中，对ADN的无功电压控制方法主要可以分为两大类：①集中式的协同控制；②分散式的自治控制。

2.1　ADN的无功电压集中控制

ADN要实现主动调控的基础是实现全面量测，因此要求有与之配套的配电网自动化、通信和能量管理系统建设。传统配电网由于网架结构相对固定、调控设备较为单一，且受通信系统的限制，多数采用“站内自动控制、站外就地控制”的措施，而ADN则具备了全局协同控制、精准控制的环境和条件。ADN的无功集中控制对象可以分为3类：①传统的无功电压控制设备，如电容器、OLTC等；②增强型设备，如分布式储能装置、配网静止同步补偿器(DSTATCOM)等；③具有无功调节能力的DG等。

2.1.1　对传统设备的协调控制

在含DG接入的馈线上采用OLTC配电变压器和电容器控制是应对DG电压扰动的一个有效措施[31-32]。但由于历史条件和发展程度的不同，OLTC在国内配电变压器中几乎没有被采用，而更多是采用低压侧的电容器补偿。当前由于配电网通信系统建设滞后的限制，低压电容器尚难以实现集中控制。

当DG参与配电网的自动调压时，有可能会造成部分配电变压器上的OLTC不稳定[33]，因此需要对DG和OLTC变压器进行协调控制。文献[34]针对中压的ADN提出一种非线性约束的最优化电压控制模型，考虑了有功网损和各种无功源的无功出力成本，以最小的调压成本为目标函数，协同OLTC、电容器、DG出力和上层电网的无功输入进行协调控制。文献[35]提出一种中压配电网主动电压控制的改进算法，协同DG机组的有功、无功出力和OLTC进行控制，通过线路节点电压与上下限的差值来设定自动电压控制(AVC)的参考电压，从而对OLTC进行自动控制。此外，在DG接入的配电变压器上装设适量动态无功补偿设备，减少电压频繁波动，是避免OLTC不稳定的一个有效措施，如文献[33]提出通过OLTC与静止无功补偿器(SVC)复合式调节，使电压偏差控制在允许的范围之内。

2.1.2　对增强型设备的协调控制

储能装置已被视为电网运行过程中“采-发-输-配-用-储”六大环节中的重要组成部分[36-39]。储能技术在很大程度上解决了新能源发电的随机性、波动性问题，能有效调节新能源发电引起的电网电压、频率及相位的变化，缓解电网调峰压力。

文献[26]从功率主动调节能力入手，从集中调控的角度建立了ADN的储能系统多目标优化配置模型。文献[40]建立了用于独立光伏发电的超级电

容器储能系统模型，指出在光伏发电系统受到光照变化及负载扰动的情况下，通过与超级电容器储能系统的协调配合，可以有效地稳定光伏系统的输出电压。文献[41]还考虑利用飞轮储能装置充当孤岛型风力发电系统中的电能调节器和储存器，运用系统的电流前馈控制方法，从时域的角度对风电和储能进行集中调控，有效地改善了电能质量。

为了充分发挥各种储能技术的优点，使其优势互补，相关学者对复合储能系统进行了研究[42-43]，能改善系统的电能质量，提高并网稳定性。

目前，国内外基于储能技术的研究大多在电力系统稳定控制、电能质量等方面，对储能在 ADN 中应用的边界条件、投资效益评估以及如何避免电压越限来进行储能的控制研究较少。

DSTATCOM 是近些年逐渐兴起的一种动态无功补偿设备，其作用是快速响应电网运行需要，能够平滑连续地补偿平衡无功负荷，其工作时能有稳定的输出，不受电网干扰和节点电压的影响，因此在倡导主动管理的 ADN 中能起到积极的推进作用。

文献[44]提出了一种协同 DG，DSTATCOM，OLTC 和电容器进行的集中无功控制，利用电容器来满足基本无功需求，DSTATCOM 来保证关键负荷的电压在合格范围内，OLTC 协同其他手段来维持整条馈线的总体电压水平。文献[45]从消纳更多 DG 的角度出发，提出了一种由 DSTATCOM 和微网组成的无功电压协同控制系统，前者作为快速连续的无功电源进行小容量的无功调节，而 DG 作为离散的控制手段进行大容量的分级无功调节，两者配合完成配电网中的无功协同控制。文献[46]则设计了一种关于 DSTATCOM 和 DG 同时接入配电网的非线性控制器，采用局部反馈把非线性控制转换为线性控制，从而为 DG 接入的配电网提供响应迅速的无功补偿。

当前，如何利用 DSTATCOM 来抑制 DG 出力波动的影响，以及两者之间在配电网中的综合协调控制成了 ADN 控制领域的一个热点问题[47-49]。

2.1.3　对 DG 的协调控制

由于有大量 DG 接入，调动其中具有调节能力的 DG 参与集中控制也将是 ADN 调压的核心手段。

文献[50]针对光伏电源接入配电网的情况提出了一种优化控制策略来管理光伏的无功功率，利用线路的节点电压水平通过矩阵计算和最优潮流得到各光伏电站的无功出力最优定值，以改善中低压配电网电压质量。文献[51]进一步考虑各 DG 之间无功功率的公平分配问题，定义了 DG 无功出力与有功出力的比值 $\tan\varphi$ 作为衡量无功出力的指标，在满足电压约束的条件下以网损和调节代价的综合最小值为目标函数，对 DG 的无功出力和 OLTC 进行协同控制。文献[52]建立了一种 ADN 的集中无功优化模型，考虑了 ADN 中各种主动管理措施，包括 DG 的无功调节、配电网络重构等，并在模型中加入了变压器损耗，考虑了不同措施之间的优先次序，使得其模型更具实际意义。然而，由于 DG 的随机性、不确定性会造成无功补偿装置的频繁投切，设备运行成本也会相应增加[53-54]，为此，文献[55]把变压器分接头操作次数、电容器投切次数归入到目标函数中进行统筹控制。文献[56]结合 ADN 复杂多样的可控元素，提出了一种适用于 ADN 的电压分层协调控制策略，采用自上而下的方式来管理 DG 的调节和 OLTC 和无功补偿设备，通过等效节点电压上下限指标可以规避常规电压控制中的调节震荡问题。文献[57]根据牛顿-拉夫逊方程推导了 DG 出力对节点电压影响的灵敏度，考虑了 DG 调节能力和需求侧管理对 ADN 进行集中控制，其控制流程如图 1 所示，可以提高网络消纳 DG 的容量，并减少配电网对输电网无功功率的依赖性。

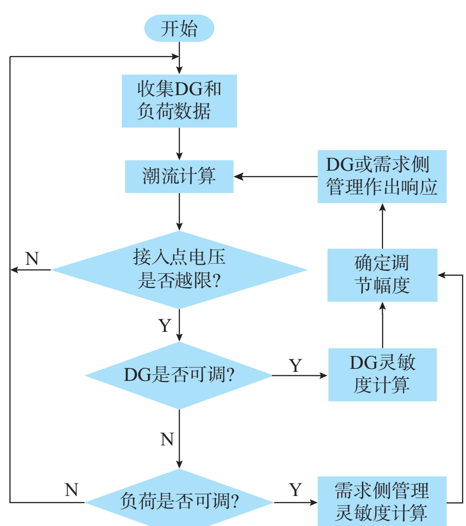

图 1　无功电压集中控制流程

Fig.1　Flow chart of reactive power and voltage centralized control

2.2　ADN 的无功电压分散控制

根据国际大电网会议对 ADN 的定义，其中一个显著特征是利用先进的信息、通信以及电力电子技术对规模化接入 DG 的配电网实施主动管理[58]。然而，现有的配电网数据采集与监控(SCADA)系统由于其构架和通信能力的局限，还难以支撑高效的

区域集中控制[59];同时,某些时候可能发生的数据错漏或者通信故障也会影响 ADN 的集中控制,威胁系统的安全运行。因此,在过渡阶段,一系列针对 ADN 的分散式无功控制策略被提出。

文献[60]指出在传统的集中式控制方案中电压控制主要是在变电站中进行,无法避免 DG 接入引起的电压抬升问题,并提出了一种针对 DG 的分布式控制策略,在并网点电压合格时 DG 采用定功率因数控制模式,在电压越限时采用电压控制模式,调节 DG 无功出力使得节点电压合格,最大限度减少 DG 对节点电压的影响。文献[61]则提出一种分布式的 DG 优化控制方法,以电压为判据对无功出力进行控制,把 DG 并网点的电压范围分为允许区间、控制区间和操作区间,基于电压灵敏度分析实现分散式的无功/有功控制,维持电压合格的同时力求减少配电网有功损耗和配电网与 DG 之间的无功交换量,其区间划分如图 2 所示。图中 V_{max} 和 V_{min} 分别为 DG 并网点的电压上下限,V_{m} 为额定电压,e_{u} 和 e_{d} 为设定的边界阈值。

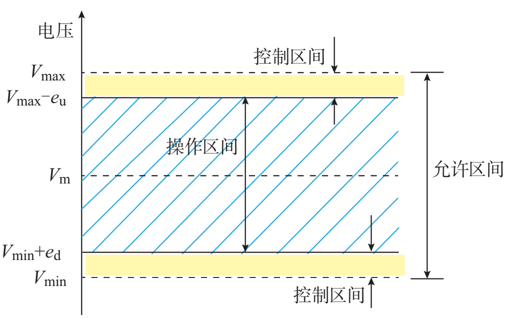

图 2 电压区间示意图
Fig.2 Schematic diagram of voltage ranges

考虑到 DG 接入后对配电网的主要影响是电压抬升问题,文献[62]针对光伏系统接入提出了一种分散式就地控制,从无功功率和电压幅值的关联角度,通过简单检测并网点电压来确定 DG 的无功出力,但这种近似线性相关的就地控制没有考虑无功出力后的电压变化,两者并非一一相关,因此可能会引起无功出力的振荡。而针对含有双馈感应风电机组的微网无功电压控制问题,文献[63]提出可以通过直接控制风电机组系统的转矩和无功功率,实现就地控制调节无功出力来维持微网中重要节点的电压质量,不需要依赖于广泛的通信和遥测。

而在电容器补偿的分散控制方面,目前一般都按照相关的技术导则对电容器实现自动投切控制[64],也有文献对这种基本的自动控制进行改进。文献[65]考虑到电容器容量投入不能连续调节,提出了一种协调主站和子站的无功电压分散控制策略,先对各子站进行独立优化控制,并反馈到上级调度,由调度部门对这些反馈量进行协调之后,再把修正后的协调量下达到子站执行,由此克服了就地控制的局限性使得电容器投入后的无功偏差量最小。文献[66]介绍了一种电容器组实时投切的模糊控制器,只需输入电容器组所在的节点电压和功率因数角的正弦值,通过模糊规则库和模糊推理就可以实现电容器的就地自动控制。文献[67]考虑了不同负荷状态下对无功补偿需求的差异性,提出一种负荷相关的电容器自动控制方法,针对负荷轻载、常载和重载分别设定了 3 组功率因数区间进行电容器的自动投切。为了避免各个电容器节点各自为政,文献[68]进一步提出以馈线首端的功率因数为评价指标,指导全线的电容器组轮流投切以维持首端的功率因数在合理范围内,可以有效提高电压合格率和降低网损。

综合而言,ADN 的无功电压集中控制需要依赖全面的数据收集和可靠的通信传输,由于 ADN 中影响无功电压的控制变量类型很多,再加上灵活可变的拓扑结构和需求侧响应,因此 ADN 的集中控制非常复杂。而分散式的就地控制可以在满足基本电压约束的前提下对 ADN 中的 DG 和各种无功设备进行控制,减少了通信的数据量和降低了控制变量的维度,可以作为 ADN 无功电压控制系统中的辅助控制和故障下的紧急控制方案。

3 有待深入研究的问题

大规模、高渗透率的 DG 在配电网接入,以及拓扑和需求侧增加的控制维度,势必会对配电网电能质量、稳定性和无功电压控制等方面造成严重的影响,为更好地消纳和利用 DG,配电系统将由传统的简单无源网络向着以复杂多源为特征的 ADN 发展是当前研究的必然趋势。结合当前 ADN 无功电压控制方面研究现状的分析,下一步需要着重研究以下问题。

1)ADN 背景下 DG 互补规划层面,如何实现不同类型的 DG 在配电网中的协调互补规划,利用不同类型 DG 的功率特性和无功电压控制特性上的差异和一定的互补性能(例如风光之间的互补或者储能对风光的柔化),减少配电网的无功电压波动和潮流波动,提高多种 DG 在配电网中的渗透率,将是一个重要的课题;研究储能在 ADN 中应用的边界条件及投资效益,更是当前电网规划领域的一个关注热点。

2)ADN 无功补偿规划和控制层面，由于 DG 出力、拓扑调整和负荷调节等因素改变了配电网的无功电压特性，传统的无功补偿配置没有及时跟随这种变化，不能完全适应配电网的无功电压快速的扰动，因此要从经济效益角度考虑 DSTATCOM 等动态无功补偿的容量选择和应用问题，尤其是在 DG 电源侧的控制；研究各种无功设备相结合的混合无功补偿配置和控制策略，既要满足快速平滑补偿无功功率，又要避免设备进行过多的、频繁的控制操作。

3)在 ADN 的需求侧主动管理层面，如何在保证供电可靠性、尽量减少停电时间的同时，通过合理的负荷调节和转移来削减负荷峰谷差并优化电网运行，是在 ADN 条件下提出的一个新的研究课题。这既要求不能一味地削减负荷减轻损耗，又要求需求侧响应发挥其应有的主动管理作用，因此需要在两者之间找到一种合适的评价体系，用以评估负荷调节产生的经济效益、电压质量改善效益和因停电造成的损失及控制上的操作成本之间的差别。

4)在 ADN 的网架拓扑层面，目前已有的研究多数只着眼于含 DG 和储能的微网结构规划，或紧急情况下的短时孤岛切换运行，而对于可灵活调整拓扑的 ADN 网架规划原则，以及在正常运行时如何通过合理调整网架来改善潮流状况和电压控制效果的研究则相当匮乏。灵活有效的拓扑调整需要依赖于配电网能量系统的实时监测和网络潮流的准确计算预测，在此过程中如何考虑网架的数学模型和优化算法，以及如何协调落实在通信和自动控制中的问题则成为重点所在。

5)目前大量文献的成果是基于国外算例和 IEEE 等抽象算例开展的研究，未考虑国内实际配电网架构特征和负荷特性等，并鲜有实践验证。此外，国外的 ADN 研究是在成熟的配电网负荷基础上，采用中压电网配合单相供电，主要利用中压 OLTC 和 DG 配合的手段；而中国的 ADN 采用三相供电加庞大的低压电网，还要考虑持续增长的负荷，而低压侧的电容器更是无功控制的主要手段。如何理论联系实际，建立符合中国配电网实际的标准 ADN 模型，进行实际的技术示范和研究成果验证，是增强理论成果可信度和科学性的关键工作。

4 结语

ADN 中由于 DG 出力的间歇性、网架的灵活调整以及需求侧的主动管理，其运行特性和无功电压特性与传统配电网有着显著的差别。结合 ADN 无功电压特性，加强 ADN 无功电压控制的理论研究和工程实践，对适应未来 DG 大规模接入以及增强配电网的主动管控技术研究具有重要的参考价值和理论支撑作用。

参 考 文 献

[1] 裴玮，盛鹍，孔力，等.布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J].中国电机工程学报，2008，28(13)：153-157.
PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 153-157.

[2] 邓威，李欣然，李培强，等.基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J].电工技术学报，2013，28(6)：216-225.
DENG Wei, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.

[3] 范明天，张祖平，苏傲雪，等.动配电系统可行技术的研究[J].中国电机工程学报，2013，33(22)：12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.

[4] HIDALGO R, ABBEY C, JOOS G. A review of active distribution networks enabling technologies[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA: 9p.

[5] CAPUDER T, ZIDAR M, ŠKRLEC D. Evolutionary algorithm with fuzzy numbers for planning active distribution network[J]. Electrical Engineering, 2012, 94(3): 135-145.

[6] AL KAABI S S, ZEINELDIN H H, KHADKIKAR V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(2): 785-793.

[7] BORGES C L T, MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.

[8] MARTINS V F, BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.

[9] CELLI G, GHIANI E, MOCCI S, et al. From passive to active distribution networks: methods and models for planning network transition and development[C]// 42nd International Conference on Large High Voltage Electric Systems, August 24-29, 2008, Paris, France: 11p.

[10] 于文鹏，刘东，余南华.线控制误差及其在主动配电网协调控制中的应用[J].中国电机工程学报，2013，33(13)：108-115.
YU Wenpeng, LIU Dong, YU Nanhua. Feeder control error and its application in coordinate control of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 108-115.

[11] 蒋毅.分布式电源对配电网电压影响及优化配置研究[D].成都:西南交通大学,2012.

[12] 康龙云,郭红霞,吴捷,等.分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J].电网技术,2010,34(11):43-47.
KANG Longyun, GUO Hongxia, WU Jie, et al. Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 43-47.

[13] 王蓓蓓,李扬,高赐威.智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J].电力系统自动化,2009,33(20):17-22.
WANG Beibei, LI Yang, GAO Ciwei. Demand side management outlook under smart grid infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 17-22.

[14] WALLING R A, SAINT R, DUGAN R C, et al. Summary of distributed resources impact on power delivery systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(3): 1636-1644.

[15] HAJIZADEH A, ALIAKBAR GOLKAR M. Intelligent robust control of hybrid distributed generation system under voltage sag[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12): 7627-7638.

[16] 章杜锡,徐祥海,杨莉,等.分布式电源对配电网过电压的影响[J].电力系统自动化,2007,31(12):50-54.
ZHANG Duxi, XU Xianghai, YANG Li, et al. The impact of distributed generators on distribution network over-voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 50-54.

[17] 赵豫,于尔铿.电力零售市场研究:(六)分散式发电对电力系统的影响[J].电力系统自动化,2003,27(15):25-28.
ZHAO Yu, YU Erkeng. Study on retail electricity market: Part six influence on the electric power system by distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 25-28.

[18] KIM T E, KIM J E. Considerations for the feasible operating range of distributed generation interconnected to power distribution system[C]// Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 25-25, 2002, Chicago, USA: 2-48.

[19] 吴栋伟,窦晓波,吴在军,等.孤岛模式下基于快速储能投退机制的微电网多源协调控制[J].电力系统自动化,2013,37(1):174-179.
WU Dongwei, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. A multi-source cooperative control strategy based on switching on and off information of active storage for microgrid in island mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 174-179.

[20] LI C, CAO C, CAO Y, et al. A review of islanding detection methods for microgrid[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 35: 221-220.

[21] 朱博,陈民铀,徐瑞林,等.孤岛模式下的微网优化运行策略[J].电力系统保护与控制,2012,40(17):35-40.
HU Bo, CHEN Minyou, XU Ruilin, et al. An optimal operation strategy of islanded microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 35-40.

[22] 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 coordination and optimization method for under frequency load shedding and pump shedding frequency safety and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 8-14.

[23] 黄玉辉.配电网拓扑的形式化表达及其应用[D].上海:上海交通大学,2013.

[24] 王少林,唐巍,白牧可,等.考虑分布式电源出力调整的多目标配电网重构[J].电力系统保护与控制,2012,40(18):117-122.
WANG Shaolin, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective optimization of distribution network reconfiguration considering adjusting the output of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 117-122.

[25] 欧阳武,程浩忠,张秀彬,等.考虑分布式电源调峰的配电网规划[J].电力系统自动化,2008,32(22):12-15.
OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin, et al. Distribution network planning considering DG for peak shaving[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 12-15.

[26] 尤毅,刘东,钟清,等.主动配电网储能系统的多目标优化配置[J].电力系统自动化,2014,38(18):46-52. DOI: 10.7500/AEPS20130722009.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-objective optimal placement of energy storage systems in an active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 46-52. DOI: 10.7500/AEPS20130722009.

[27] 钟清,孙闻,余南华,等.主动配电网规划中的负荷预测与发电预测[J].中国电机工程学报,2014,34(19):3050-3056.
ZHONG Qing, SUN Wen, YU Nanhua, et al. Load and power forecasting in active distribution network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3050-3056.

[28] 李惠玲,白晓民.电动汽车充电对配电网的影响及对策[J].电力系统自动化,2011,35(17):38-43.
LI Huiling, BAI Xiaomin. Impacts of electric vehicles charging of distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 38-43.

[29] 薛飞,雷宪章,张野飚,等.电动汽车与智能电网从 V2G 到 B2G 的全新结合模式[J].电网技术,2012,36(2):29-34.
XUE Fei, LEI Xianzhang, ZHANG Yebiao, et al. A brand-new approach of connecting electrical vehicles with smart grid from vehicle-to-grid mode to battery-to-grid mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 29-34.

[30] ZHONG J, HE L, LI C, et al. Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation[J]. Applied Energy, 2014, 123: 253-262.

[31] 胡波,野中佑斗,横山隆.大规模光伏系统并网对配电网的影响[J].电力系统自动化,2012,36(3):34-38.
HU Bo, NONAKA Y, YOKOYAMA R. Influence of large-scale grid-connected photovoltaic system on distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 34-38.

[32] 费丽强,赵娜.基于 OLTC 和 SVC 的光伏并网发电电压控制技

术研究[J].电网与清洁能源,2012,28(5):50-53.
FEI Liqiang, ZHAO Na. Voltage control technology of photovoltaic grid-connected power generation base on OLTC and SVC[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(5): 50-53.
[33] VOVOS P N, KIPRAKIS A E, WALLACE A R, et al. Centralized and distributed voltage control: impact on distributed generation penetration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 476-483.
[34] CONTI S, GRECO A M. Voltage regulation through optimal reactive power dispatching in active distribution networks [C]// The 14th IEEE Mediterranean Electro-technical Conference, May 5-7, 2008, Ajaccio, France: 792-798.
[35] LEISSE I, SAMUELSSON O, SVENSSON, J. Coordinated voltage control in distribution systems with DG-control algorithm and case study[C]// CIRED Workshop, May 29-30, 2012, Lisbon, Portugal: 4p.
[36] BHARGAVA B, DISHAW G. Application of an energy source power system stabilizer on the 10 MW battery energy storage system at Chino substation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 145-151.
[37] CIPCIGAN L M, TAYLOR P C. Investigation of the reverse power flow requirements of high penetrations of small-scale embedded generation[J]. Renewable Power Generation, 2007, 1(3): 160-166.
[38] KYUNG S K, MCKENZIE K J, LIU Y L, et al. A study on applications of energy storage for the wind power operation in power systems[C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006, Montreál, Canada.
[39] JEWELL W T. Electric industry infrastructure for sustainability: climate change and energy storage[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 3p.
[40] 刘建涛,张建成.一种基于超级电容器的光伏系统电压控制方法研究[J].电网与清洁能源,2010,26(11):107-111.
LIU Jiantao, ZHANG Jiancheng. A voltage control method for PV system based on super capacitors[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(11): 107-111.
[41] CARDENAS R, PENA R, CLARE J. Control strategy for power smoothing vector controlled induction machine and fly-wheel[J]. Electronics Letters, 2000, 36(8): 625-635.
[42] 王虹富,曹军,邱家驹,等.一种用于分布式发电系统的有功功率补偿模型[J].电力系统自动化,2009,33(8):94-98.
WANG Hongfu, CAO Jun, QIU Jiaju, et al. An active power compensation model for grid-connected distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 94-98.
[43] ISE T, KITA M, TAGUCH A. A hybrid energy storage with an SMES and secondary battery[J]. IEEE Trans on Applied Super Conductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.
[44] MAJUMDER R. Aspect of voltage stability and reactive power support in active distribution[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(3): 42-45.
[45] 吕志鹏,罗安,周柯,等.静止同步补偿器与微网在配电网无功电压协同控制中的联合运用[J].中国电机工程学报,2010,30(增刊1):18-24.
LÜ Zhipeng, LUO An, ZHOU Ke, et al. Combined application of DSTATCOM and micro-grid in reactive power and voltage collaborative control on distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(Supplement 1): 18-24.
[46] MAHMUD M M A, POTA H R, HOSSAIN M J. Partial feedback linearizing controller design for a DSTATCOM to enhance voltage stability of distribution network with distributed generation[C]// IEEE International Conference on Power System Technology, October 30-November 2, 2012, Auckland, New Zealand: 6p.
[47] SINGH B, SOLANK J. Load compensation for diesel generator-based isolated generation system employing DSTATCOM [C]// International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, December 12-15, 2006, New Delhi, India: 238-244.
[48] DEVI S, GEETHANJALI M. Optimal location and sizing determination of distributed generation and DSTATCOM using particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 62: 62-570.
[49] 杨昆,陈国柱.基于重复控制的DSTATCOM补偿电流控制[J].电力系统自动化,2013,37(10):80-85.
YANG Kun, CHEN Guozhu. Compensation current control for DSTATCOM based on repetitive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 80-85.
[50] BONFIGLIO A, BRIGNONE M, DELFINO F. Optimal control and operation of grid-connected photovoltaic production units for voltage support in medium-voltage networks[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 254-263.
[51] KOLENC M, PAPIC I, BLAZIC B. Coordinated reactive power control to ensure fairness in active distribution grids [C]// 8th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), June 5-7, 2013, Ljubljana, Slovenia: 109-114.
[52] 邢海军,程浩忠,张逸.基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J].电网技术,2015,39(6):1504-1510.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510.
[53] 刘自发,刘刚,刘幸.基于量子差分进化算法的分布式电源协调优化调度[J].电网技术,2013,37(7):1922-1928.
LIU Zifa, LIU Gang, LIU Xing. Coordinated optimal dispatching of distributed generation based on quantum differential evolution algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1922-1928.
[54] LIU M B, CANIZARES C A, HUANG W. Reactive power and voltage control in distribution systems with limited switching operations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1): 427-436.
[55] 陈树恒,党晓强,李兴源,等.考虑DG接入与设备运行成本的配电网无功优化[J].电力系统保护与控制,2012,40(21):36-

41.
CHEN Shuheng, DANG Xiaoqiang, LI Xingyuan, et al. Reactive power optimization for distribution system with distribution generators considering device cost [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 36-41.
[56] 陈飞，刘东，陈云辉.主动配电网电压分层协调控制策略[J].电力系统自动化，2015，39(9)：61-67. DOI：10.7500/AEPS20141130006.
CHEN Fei, LIU Dong, CHEN Yunhui. Hierarchically distributed voltage control strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 61-67. DOI: 10.7500/AEPS20141130006.
[57] ABBOTT S R, FOX B, MORROW D J. Sensitivity-based dispatch of DG for voltage control[C]// IEEE PES General Meeting/Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, USA: 5p.
[58] 尤毅，刘东，于文鹏，等.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化，2012，36(18)：10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
[59] QIANG Y, BARRIA J A, ARAMBURO C A H. Communication infrastructures to facilitate regional voltage control of active radial distribution networks[C]// 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, August 2-5, 2009, Cancun, Mexico: 284-287.
[60] SANSAWATT T, O'ONNELL J, OCHOA L F. et al. Decentralised voltage control for active distribution networks [C]// Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 1-4, 2009, Glasgow, UK: 5p.
[61] CALDERARO V, CONIO G, GALDI V, et al. Optimal decentralized voltage control for distribution systems with inverter-based distributed generators[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(1): 30-241.
[62] MOLINA G A, MASTROMAURO R A, LISERRE M. A combined centralized/decentralized voltage regulation method for PV inverters in LV distribution networks[C]// IEEE PES General Meeting/Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, USA: 5p.
[63] AGHATEHRANI R, KAVASSERI R. Sliding mode control approach for voltage regulation in microgrids with DFIG based wind generations [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, San Diego, USA: 8p.
[64] 国家电网公司电力系统无功补偿配置技术原则：国家电网公司生〔2004〕435 号[S].2004.
[65] 黄有为，王承民，林子钊.配网无功电压分散协调控制策略研究[J].继电器，2005，33(18)：36-39.
HUANG Youwei, WANG Chengmin, LIN Zizhao. Research on coordinated control strategy for reactive power and voltage in distribution network[J]. Relay, 2005, 33(18): 36-39.
[66] 程晓东，刘万顺.配电补偿电容器的模糊控制[J].现代电力，2001，18(3)：52-56.
CHENG Xiaodong, LIU Wanshun. Fuzzy control of compensation capacitors in distribution networks[J]. Modern Electric Power, 2001, 18(3): 52-56.
[67] 张勇军，黄向敏，陈旭.负荷相关的低压动态无功补偿电容器自动控制方法：中国，CN201310374496[P].2014-02-26.
[68] 张勇军，黄向敏，李钦豪.阶梯式配电网低压智能电容器控制方法：中国，CN201410023940[P].2014-04-30.

陈　旭(1976—)，男，博士研究生，高级工程师，主要研究方向：电力系统规划。E-mail：chenxu@csg.cn

张勇军(1973—)，男，教授，博士生导师，主要研究方向：电力系统无功优化和电压控制、电力系统可靠性与规划。E-mail：zhangjun@scut.edu.cn

黄向敏(1990—)，男，通信作者，硕士研究生，主要研究方向：配电网无功规划和主动配电网。E-mail：553686983@qq.com

（编辑　蔡静雯）

Review of Reactive Power and Voltage Control Method in the Background of Active Distribution Network

CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin

(Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to adapt to the access of high penetration and large-scale distributed generators (DGs), the active distribution network (ADN) has become the research trend of current and future smart grids. The influences of DG access, demand-side management and topology changes on the voltage distribution and voltage stability of distribution network in the AND background are reviewed. The reactive power and voltage control method of ADN are summarized from the perspective of centralized and decentralized control. According to an analysis of the current research status, some of the problems and shortcomings of research on reactive power and voltage control method of AND influenced by various factors are briefly treated. Some problems in research on the AND reactive power and voltage control method are pointed out.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377060).

Key words: distributed generator (DG); active distribution network (ADN); reactive power; voltage; demand-side management (DSM)