

降压节能技术研究综述

戴诗朦¹ 孙 鸣¹ 刘俊勇² 羊 静³

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

3. 国网四川节能服务有限公司, 四川 成都 610021)

摘要: 降压节能(conservation voltage reduction, CVR)是一种欧美电力机构普遍使用的通过降低配电系统电压水平来降低峰荷时期负荷需求并实现能源节约的技术。近年来,国内许多地区的电网都存在峰荷时期供电容量不足的问题,导致部分用户断电,造成较大的经济损失。如果单纯的通过扩大发电机组装机容量来解决问题,投入较高,并且在用电低谷时会出现发电机效率低下的问题,而降压节能技术能够经济有效地解决该问题。首先对CVR技术的发展历程进行简单回顾;随后介绍CVR技术相关的定义及其主要实现方法;然后对该技术的效益量化评估方式进行总结与对比,并对分布式电源与CVR技术的相互关系进行分析与讨论;最后结合国内配电网实际情况对CVR技术在中国的实际运用进行探讨。

关键词: 降压节能; 配电网; 峰荷需求; 能源节约; 分布式电源

Abstract: Conservation voltage reduction (CVR) technique can reduce the peak demand and achieve energy saving via voltage level reduction of distribution system, which is widely used by the power utilities of the US and Europe. In recent years, the supply capacity of domestic distribution network fails to meet the peak demand, and CVR is an economical and effective way to solve this problem. Firstly, the development of CVR is reviewed and the related concepts are introduced. Then, a summary and the comparison of the assessment methods of CVR are provided. Besides, the relationships and impacts between CVR and distributed generators are analyzed. Discussion about the application of CVR in China is included in the end.

Key words: conservation voltage reduction (CVR); distribution network; peak demand; energy saving; distributed generators

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0001-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.001

0 引言

随着人类经济社会的发展、人口的迅速增长,主要的两种燃料资源——石油和天然气正快速被消耗,能源节约这一主题逐渐受到世界范围的重视。降压节能(conservation voltage reduction, CVR)技术的提出不仅是可以用来解决短期供电不足问题的临时性措施,也可用来节约能源的长期性措施。

降压节能技术是一种通过将用电电压降低到标准电压范围下半区从而实现降低峰荷与能源节约的技术。1973年美国电力公司选择不同负荷组成的配电馈线对CVR技术进行了现场试验与分析。试验为期1年,每隔15 min采集一次数据,采用CVR装置运行1天、停止1天的操作模式(因为连续两天

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2014AA051901)

的天气情况与环境因素变化较小,能够尽量减小这些因素对于CVR效果的影响),每天的降压时间控制在4 h。试验结果发现CVR在降低峰荷方面具有明显作用,持续4 h电压降低5%可以降低4%的供电需求,而降低能量损耗方面的效果则相对不那么明显。由于当时能源充足,节能意识弱,考虑投入成本与效益比,人们对于通过更长时间降压来获取更明显的节能效果颇有争议,因此CVR技术并没有被充分地接受与使用^[1]。

面对大多数人心目中依旧存在的对CVR作用的怀疑,南加州爱迪生电力公司^[2]、美国东北电力公司^[3]、邦纳维尔电力局^[4]以及卑诗水电公司^[5]等电力机构先后进行了相应的CVR测试试验,试验多将CVR的控制时间在之前的基础上进行延长,发现每降低1%的电压能够降低0.3%~1%的负荷需求。KP Schneider等学者2010年通过GridLAB-D仿真系统

对24种馈线进行CVR装置接入前后的负荷需求以及能源消耗数据对比发现:如果美国所有的馈线都接入CVR装置,则年能源消耗量可以减少3.04%^[6]。此外爱尔兰^[7]以及澳大利亚^[8]等国家也分别对CVR接入本国电力系统的效益进行了试验评估,试验结果均对CVR的相应效果予以了肯定。

下面首先对CVR技术的相关基本概念进行简短的描述,随后总结CVR技术的效益评估方法,然后对CVR技术与分布式电源之间的关系进行讨论,最后结合国内配电网的实际情况对CVR技术在国内的应用进行探讨。

1 CVR技术相关概念

1.1 CVR技术的相关定义

降压节能技术通过调压措施将用户用电电压降到标准电压的下半区(即0.95 p.u. ~ 1.0 p.u.)从而在保证不对用电设备造成伤害的同时,降低系统总功率需求实现能源的节约,充分地提高了用户供电的可靠性并且也促进了电网整体的能源节约。CVR技术的效益通常通过CVR因子(conservation voltage reduction factor, f_{CVR})来表示,是减少的功率需求(能量损耗)百分比 $\Delta P\%$ 与降低的电压百分比 $\Delta U\%$ 的比值,具体的算式如式(1)所示:

$$f_{CVR} = \frac{\Delta P\%}{\Delta U\%} \quad (1)$$

CVR的效益主要由负荷的组成决定,系统的总功率需求主要由负荷需求和线路损耗两部分组成, $P_{load} = UI$, $P_{lines} = I^2 R_{lines}$ 。当负荷为恒阻抗负荷(白炽灯)时,电压降低,电流也降低,负荷损耗和线路损耗均降低,最终使总功率需求降低。但当负荷为诸如电脑、电视机等恒功率负荷时,电压下降意味着电流上升,负荷损耗不变而线损增加,这样系统总功率需求增加。而对于电热水器和电冰箱这一类带有温控回路的负荷,其损耗保持恒定。此外还有节能灯一类的恒电流负荷,电压下降使负荷损耗减少,而线损保持不变,故总体功率需求下降。Ellens, W等学者在经过详细实验对比后发现,恒功率负荷增加的损耗相对恒阻抗负荷减少的只是很小的一部分,只要恒功率负荷消耗的能量不大于恒阻抗负荷的50倍,那么系统在降低电压之后总体上的功率需求是减少的^[8]。

1.2 CVR技术的实现方法

CVR的实现可以通过多种渠道,传统且使用最普遍的方式是通过变电站调压变压器(on-load tap-changers, OLTC)或者馈线调压器进行直接降压处理,操作简单、成本低廉。但这种调节方式存在一定的缺陷,如果馈线较长,线路上的电压损耗较大,则会导致线路末端的电压水平较低,使得电压可以下调的范围十分受限。对于电压降较大的线路,为了保证馈线末端能够拥有足够的降压裕度,可以在配电馈线的适当位置安装无功补偿装置,对线路的电压无功条件进行改善。文献[10-12]均在馈线沿线电压降较大的节点安装并联电容器组或者可投切电容器组,以支撑该类节点的电压并进行功率因数的矫正,缩小馈线沿线电压最大与最小值差,保证扁平的馈线电压以及功率因数分布特性,为CVR的实现提供良好的电压无功条件。图1所示为接入并联电容器组前后的线路电压分布情况。

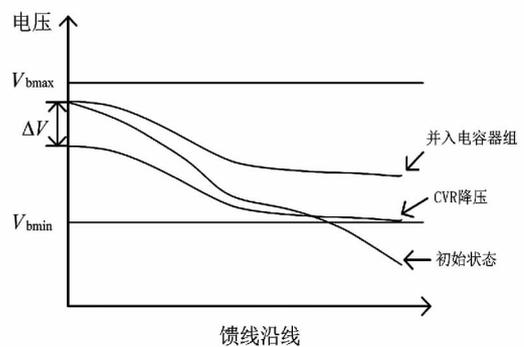


图1 线路电压分布对比图

上述方法均建立在变电站带有OLTC或者线路装有馈线调压器的情况之下。当系统没有该类装置时,单使用电容器组亦可以达到调节电压的目的,只是电压调节范围相对较小^[13]。除了在变电站或者馈线沿线调压之外,也可以在用户侧安装调压装置直接进行调压;但由于需由用户自行安装设备,且并不会减少线路损耗,所以这种方法并不常使用。

随着配电系统的结构日益复杂,其数据信息动态多变,以上提到的传统控制方法难以随信息变化而保持动态控制,因此提出了更加先进的闭环控制方法,其主要是通过能够实现CVR的集中式VVC来实现^[14]。集中式的VVC是指地调中心通过数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)获得各地不同设备测量得到的关键位置电力数据,通过分析计算直接对变电站

的 OLTC、线路的馈线调节器、电容器组等发出控制指令以实现全网最优化的控制方式。文献 [15 - 16] 提到的 AdaptiVol™ 系统(电压自适应系统)则是较早提出的能够充分实现 CVR 的 VVC 闭环控制系统。闭环控制方式虽然能够弥补传统控制方式存在的诸多缺点,但其控制方式较为复杂,投资成本也相对较高。

2 CVR 的效益评估

通常来说 CVR 的效益评估方法总体上分为三大类:回归法、合成法以及对比法。

2.1 回归法

回归法通常是通过建立负荷与其诸多影响因子的线性模型,如定义负荷模型:

$$L = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 \Delta V + \varepsilon \quad (2)$$

式中: α_0 表示基本负荷分量,为恒定值; α_1 为负荷对温度的敏感系数; α_2 为负荷对电压的敏感系数(load to - voltage dependence, LTV); ε 为误差; T 为温度; ΔV 为变电站电压的变化值。从该模型的各项系数可以看出负荷对于对应影响因子的灵敏度,其中 LTV 反映负荷对于电压变化的灵敏程度。在电压降低值固定的情况下,负荷下降越多则能量损耗减少越多,因此,多元线性回归法的本质就是通过确定 LTV 来得到 f_{CVR} 。前面提到的美国电力公司^[1]以及卑诗水电公司^[5]进行的现场实验均通过这种方法来进行 CVR 技术的效益评估。除了温度、电压之外,测量时间等也可被纳入影响因子中,当然最终只有电压变化的敏感系数用于 f_{CVR} 的计算^[17]。这里所提到的回归法均建立的是线性回归模型,其精确度决定于负荷模型建立的准确度,而实际上负荷与许多影响因子的关系是非线性的。随着人工神经网络、支持向量回归法等非线性回归方法的提出,使得模拟负荷与影响因子的非线性关系成为可能。Zhaoyu Wang 等学者提出通过一种多阶段支持向量回归法来建立负荷模型,计算出 CVR 试验周期中未进行降压处理的对照组的负荷水平,该方法不依赖于假设负荷与影响因子的任何线性关系,现场试验验证该方法有效且结果精确度高^[18]。目前将非线性回归方法用于 CVR 效益评估的研究还较少,有待更深入更全面的探寻。

2.2 合成法

合成法通过将各类负荷与电压的关系进行合成来计算 CVR 的效益。通常有两种实现合成的方法:按负荷组成合成和按用户类别合成^[19]。在按负荷组成合成时,主要电气负荷的能量损耗模型通过实验室测试定义为一个电压的函数,而每一种电气负荷所占总负荷的百分比则通过调查统计获得。整个电路的总能量损耗可以通过式(3)计算:

$$E_T(V) = \sum_i E_i(V) S_i \quad (3)$$

式中: $E_i(V)$ 为第 i 种电气负荷在电压 V 时的能量损耗; S_i 为第 i 种电气负荷所占总负荷的比例。对电压进行降压处理,通过处理前后的能量损耗计算出 f_{CVR} 。按照用户类别合成法中,用户可以分为住宅用户、商业用户以及工业用户 3 类,不同的用户类别其电气负荷组成百分比各有不同。通过美国各电力公司对不同用户类别的测量统计,可以发现降压后,住宅用户和商业用户可以减少更多的能量损耗,因为这两类用户对于电压变化具有更高的灵敏度。由此,线路的 f_{CVR} 可以通过 3 种用户类别的 f_{CVR} 进行线性合成:

$$f_{CVR} = R\%f_{CVR-R} + C\%f_{CVR-C} + L\%f_{CVR-L} \quad (4)$$

式中: $R\%$ 、 $C\%$ 、 $L\%$ 分别为负荷中住宅用户、商业用户以及工业用户的百分比; f_{CVR-R} 、 f_{CVR-C} 、 f_{CVR-L} 分别为住宅用户、商业用户以及工业用户的 CVR 因子。合成法的基础假设是所有的电气负荷均按照其出厂前的实验测量数据工作,而现实中其实很难采集到具体每一种电气负荷的 LTV 以及电力系统中各类负荷所占比例的准确信息。

2.3 对比法

对比法主要是通过实验组与对照组的对比,获得 CVR 操作前后的负荷需求以及功率损耗,而后根据实验数据计算出 f_{CVR} 。早期的多数现场试验均采用这种方法,这种方法最大的问题是变量控制精确度有限,难以避免负荷波动、环境变化等其他因素对 f_{CVR} 计算准确度的影响。有许多研究采用多次测量取平均数据的方法虽能在一定程度上减少误差,但是却无法获取特定时间的 f_{CVR} ,使得 f_{CVR} 不具有时效性。

随着科技的发展,仿真软件功能的日益强大为对比法提供了进步的空间。通过仿真软件可以得到测试周期内未进行 CVR 技术处理之前的能量损耗,而通过测量装置可以得到进行降压处理后的能量损耗,通过两种方法得到的能量损耗差值则可计算得

到 f_{CVR} 。该方法所得结果的精确度决定于仿真模型中负荷模型的精确度。Zhaoyu Wang 等对计算 f_{CVR} 所需的时变负荷模型建立方法进行了深入的研究,首先提出了一种基于最小二乘法的指数负荷模型,该方法不需要建立对比试验组或者假设负荷与影响因子的线性关系,充分反应了 f_{CVR} 的不确定性^[20],不过该方法使用的最小二乘法在应对参数突变、观测噪声等常见实际测量问题时鲁棒性较差。随后又提出一种基于无损卡尔曼滤波法的负荷模型方法。该方法通过无损卡尔曼滤波法对系统状态的概率密度函数进行逼近以确定指数时变负荷模型的负荷参数,计算精度高,且能够充分应对测量过程中的观测噪声等^[21]。前面提到的两种方法均采用指数型负荷模型,该模型不能反应负荷组成结构的变化,于是在前面所述方法的基础上又提出一种鲁棒时变负荷建模方法。该方法用 ZIP 静态模型取代指数静态模型,通过负荷种类比例的变化来反映负荷组成的变化;通过可变遗忘因子来改善递归最小二乘法的鲁棒性,准确地建立了时变负荷模型,且该模型能够充分应对测量过程中的突然波动干扰^[22]。

3 分布式电源与 CVR

光伏、风能这一类分布式电源(distributed generator, DG)的接入能够大幅提升电网的清洁度,并从一定程度上减少配电网的容量需求负担,但由于它们的输出功率与天气情况有关,具有随机性与不稳定性^[23]。因此,DG的接入不仅会造成电压的陡升使馈线沿线的电压分布变化得更频繁,同时产生大量的逆潮流,导致系统中的电容器组动作次数增加,对该类设备的可靠运行造成了不利影响。此外,DG出力的不确定性使得系统结构变化更加频繁,加大了CVR效益评估的难度^[24]。

另一方面,大量研究发现:DG与CVR技术的良好配合能够进一步促进能源的节约。Singh等学者通过IEEE 13节点测试馈线针对分布式光伏电源接入配电网后对CVR的影响进行了分析,发现在安装CVR装置的情况下,DG接入渗透率较低时对电压的提升作用并不明显,并且在一定范围内,随着DG渗透率的增加,系统的能量损耗呈下降趋势^[25]。Rahimi等以ZIP负荷模型为基础,将光伏出力看作光辐射度的线性函数,发现分布式光伏电源的接入

等效降低了恒功率负荷在总负荷中所占的比重,从而促进了能量损耗的减少,提高了系统的效益^[26]。D. A. Quijano等考虑DG在输出有功功率的同时也产生无功输出,通过多层次的仿真对比发现DG的无功注入能够有效地改善系统的电压分布情况。此外,在DG渗透率低于80%时对于系统的总有功需求没有明显影响,而当渗透率高于80%时则会明显导致有功需求的增加。因此当DG渗透率不超过80%时,可以通过DG的无功注入在不增加系统有功需求的同时对电压质量进行改善,为CVR的实现提供良好的电压分布条件^[27]。Bokhari等提出根据节点的不同负荷需求接入不同类型的DG:负荷需求较大节点接入同步电机类DG,负荷需求较小的节点接入逆变器类DG来实现降压节能所需的馈线沿线扁平电压分布^[28]。Zhaoyu Wang等考虑DG出力的不确定性将DG最优位置的确定看作一个随机最优化问题,提出一种样本均值近似算法,通过多次递归计算候选方案和最优方案差距的置信区间,多情景仿真证明该方法能够实现DG的优化配置,促进CVR的节能降损效益^[29]。

此外,为适应DG接入后系统表现出的诸多变化,CVR的实现方法需要进行一定的调整。上面提到的传统实现方法通常使用OLTC、馈线调压器以及电容器组等设备来实现,而这些设备均有一定的反应延迟时间,在包含DG的配电系统中,电路结构的变化更加频繁与迅速,这就意味着需要投入更加快速的控制设备。高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)由每个节点或设备上的新型传感器与具有独立操作系统的处理器相联结,通过高速宽带光纤通信将测得的信息进行双向传输,形成分布式的统计平台,能够快速完成分析判断和协调控制等工作^[30]。Chunxue Zhang等提出基于AMI数据的原对偶内点建模法,该方法比起遗传算法等常用算法在优化电容器组运行规律以及节能等方面具有明显的优点^[31]。北卡罗纳州电力公司、卑诗水电公司等电力机构通过试验发现AMI能够促进配电系统的优化运行,实现更为精确的电压优化,使CVR的能源节约率较之前提高近40%^[32-33]。此外,逆变器可以实现连续快速的动态无功供给且运行成本低廉,目前已经有学者通过控制逆变器的无功输出来实现电压的调节^[34-36]。南加州爱迪生电力公司在最新的试验中还提出一种基于AMI和光

伏逆变器的双闭环电压控制方法,该方法能够快速精确地实现CVR^[37]。未来,如何结合新兴的电力电子设备,在DG与CVR的良好配合下,实现快速、动态的CVR操作,进一步促进能源节约是值得深入研究的问题。

4 关于CVR技术在国内运用的探讨

国内电网电压无功控制的主要目标大多依旧停留在保持电压等级以及功率因数这一层面,因而相对于国内CVR技术应用的空白,动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)等解决电压突变问题的设备已充分投入到配电网使用。

DVR是一种串联型电能质量控制装置,当电网电压发生电压暂降时,DVR向电路注入一个幅值、相角可控的串联补偿电压,以保证负荷电压恒定。常见的DVR结构如图2,控制单元控制电压型逆变器产生串联补偿电压,经串联变压器注入线路中^[39]。DVR能够解决由于电压质量不合格所引发的诸多问题,有效地保证了电能质量,不过由于需要储能装置以及串联变压器等设备,使其投入成本较高。从长远来看,清洁节能的电力系统是必然的发展方向,而CVR技术与DVR技术相比能够在保证电压水平的基础上降低峰荷与能量损耗,且设备组成简单,性价比较高。

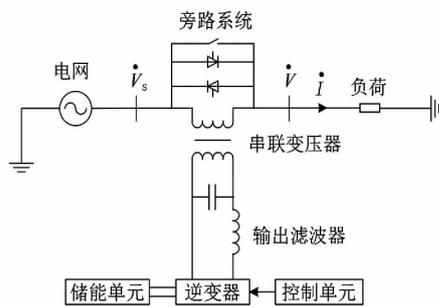


图2 DVR的基本结构

此外,近年来,夏季的高温峰荷时期,国内许多地区的电网都存在供电容量不足的问题,造成部分用户断电。如果单纯地通过扩大发电机组装机容量来解决问题,投入较高,并且在用电低谷时会出现发电机效率低下的问题。在此背景下,降压节能技术操作简便,易于实现,能够经济有效地解决峰荷时期供电容量不足问题。

目前国内多数地区依旧以水电以及火电为主要

供电来源,分布式新能源渗透率低,这使得CVR的实现较为容易。考虑到所提到的CVR效益主要与负荷组成有关,可以将CVR技术在恒阻抗负荷以及恒电流阻抗使用比例较大的用户住宅区以及商业区投入使用,在解决短期供电容量不足问题的同时实现长期的能源节约。

CVR技术最早是在欧美国家提出并使用的,而欧美国家的电力系统特性与中国有一定的差异,因此CVR技术在国内进行运用时需考虑到这些差异。欧美国家的CVR装置通常安装在用户用电侧(120V侧,即对应国内的220V用电电压)。而CVR装置应包括两部分:一部分是调压装置,主要通过调节分接头来实现电压的降低;另一部分则是无功调控设备,如并联电容器组、可投切电容器组等。其主要目的是为系统提供足够的无功功率,有效提高电能质量并且降低系统损耗,为降压节能的有效实现提供良好的电压无功条件。

以用户住宅为例,国外多为单独成栋的别墅,大多别墅拥有单独的配电箱,可以直接在配电箱中安装CVR装置的无功调控设备,并在120V配电馈线上直接安装单相步进调压器作为调压设备,成本低廉,操作简单。而中国多为群居的民宅,国外直接在用户住宅单户接入无功调控设备的方法在中国并不适用,因此考虑在10kV配电侧安装CVR装置的无功调控部分。但中国10kV线路多为不接地结构,因此无法直接接入单相步进调压器,而三相馈线调压器成本较高,大量投入并不现实,因此考虑通过变电站自带的有载调压变压器来实现调压。

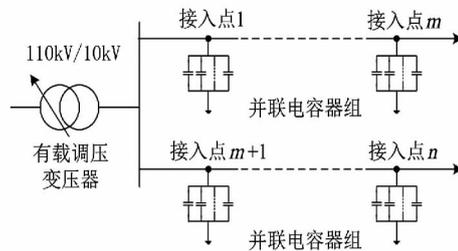


图3 带CVR装置的辐射型配电系统

结合以上考虑,在国内配电网安装CVR装置应在10kV配电侧根据系统实际无功电压分布情况来选择合适位置接入无功调控设备,实现无功电压的优化,再通过变电站有载调压变压器分抽头降低配电电压,从而实现用户用电电压的降低,以达到降压节能的目的。带CVR装置的辐射型配电系统典型结构如图3所示,该系统选择并联电容器组作为无

功调控设备,共有 n 处并联电容器接入点($m \in [1, n]$),变电站有载调压变压器作为调压装置。

5 结 语

随着配电网结构的日益复杂,降压节能技术主要有以下3个研究重点:1)多个电压无功控制装置之间的协调与配合。不同的控制设备之间互相影响,实现彼此的良好配合是保证系统电压无功的必然前提。2)CVR的有效实现方法与经济评估方法。随着新能源以及动态负荷等的出现,CVR的实现方法以及效益评估方法需要随之改进,以保证其有效性以及准确性。3)CVR与DG之间的协调与配合。充分考虑DG接入系统对CVR的影响:一方面考虑DG接入对于CVR实现与评估方法带来的挑战;另一方面考虑通过二者的良好配合实现DG对于CVR的促进作用,提高CVR的效益。

降压节能技术在解决供电容量不足以及能源短缺问题上拥有充分的潜力,尽管该技术目前在国内还未充分投入使用,但是相信随着该技术相关研究的逐步成熟,其优势会被充分挖掘,未来配电网的运行与控制将会因此受益。

参考文献

[1] Preiss R F, Warnock V J. Impact of Voltage Reduction on Energy and Demand [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1978, PAS - 97 (5): 1665 - 1671.

[2] Williams B R. Distribution Capacitor Automation Provides Integrated Control of Customer Voltage Levels and Distribution Reactive Power Flow [C] // IEEE Power Industry Computer Application Conference, 1995: 215 - 220.

[3] Lauria D M. Conservation Voltage Reduction (CVR) at Northeast Utilities [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(4): 1186 - 1191.

[4] Desteese J G, Englin J E, Sands R D. Conservation Voltage Reduction Potential in the Pacific Northwest [C] // Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1990: 43 - 47.

[5] Dwyer A, Nielsen R E, Stangl J, et al. Load to Voltage Dependency Tests at BC Hydro [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 709 - 715.

[6] Schneider K P, Fuller J C, Tuffner F K, et al. Evalua-

tion of Conservation Voltage Reduction (CVR) on a National Level [R]. U. S. Department Of Energy: Pacific Northwest National Laboratory, 2010.

[7] Diskin E, Fallon T, Mahony G O, et al. Conservation Voltage Reduction and Voltage Optimisation on Irish Distribution Networks [C] // Integration of Renewables into the Distribution Grid, CIRED 2012 Workshop, 2012: 1 - 4.

[8] Ellens W, Berry A, West S. A Quantification of the Energy Savings by Conservation Voltage Reduction [C] // IEEE International Conference Power System Technology (POWERCON), 2012: 1 - 6.

[9] Triplett J M, Kufel S A. Implementing CVR through Voltage Regulator LDC Settings [C] // Rural Electric Power Conference, 2012(B2): 1 - 5.

[10] Mccarthy C A, Josken J. Applying Capacitors to Maximize Benefits of Conservation Voltage Reduction [C] // Rural Electric Power Conference, 2003(C4): 1 - 5.

[11] Krok M J, Genc S. A Coordinated Optimization Approach to Volt/Var Control for Large Power Distribution Networks [C] // American Control Conference (ACC), 2011: 1145 - 1150.

[12] Milosevic, Begovic M. Capacitor Placement for Conservation Voltage Reduction on Distribution Feeders [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1360 - 1367.

[13] Fagen K C. Distribution Efficiency Voltage Optimization Supports Lowest Cost New Resource [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1 - 6.

[14] Uluski R W. VVC in the Smart Grid Era [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1 - 7.

[15] Wilson T, Bell D, Wilson T, et al. Saving Megawatts with Voltage Optimization [C] // Thirty - second Industrial Energy Technology Conference, 2010.

[16] Wilson T L, Bell D G. Energy Conservation and Demand Control Using Distribution Automation Technologies [C] // Rural Electric Power Conference, 2004 (C4): 1 - 12.

[17] Markushevich N, Berman A, Nielsen R. Methodologies for Assessment of Actual Field Results of Distribution Voltage and Var Optimization [C] // 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2012: 1 - 5.

[18] Wang Z, Begovic M, Wang J. Analysis of Conservation Voltage Reduction Effects Based on Multistage SVR and

- Stochastic Process [C] // IEEE PES General Meeting Conference & Exposition ,2014: 431 –439.
- [19] Wang Z , Wang J. Review on Implementation and Assessment of Conservation Voltage Reduction [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2014 ,29(3) : 1306 –1315.
- [20] Wang Z , Wang J. Time – varying Stochastic Assessment of Conservation Voltage Reduction Based on Load Modeling [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2014 ,29(5) : 2321 –2328.
- [21] Wang Z. Assessment of Conservation Voltage Reduction by Unscented Kalman Filter based Load Modeling [C] // Power and Energy Society General Meeting (PESGM) ,2016: 17 –21.
- [22] Zhao J , Wang Z , Wang J. Robust Time – varying Load Modeling for Conservation Voltage Reduction Assessment [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2016 , PP(99) : 1 –1.
- [23] 王昌照,汪隆君,王钢,等. 分布式电源出力与负荷相关性对配电网可靠性的影响分析 [J]. 电力自动化设备,2015 ,35(6) :99 –105.
- [24] Markushevich N , Berman A. New Aspects of IVVO in Active Distribution Networks [C] // 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference & Exposition ,2012: 1 –5.
- [25] Sing R , Tuffner F , Fuller J , et al. Effects of Distributed Energy Resources on Conservation Voltage Reduction [C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting ,2011: 1 –7.
- [26] Rahimi A , Cloninger A , Zarghami M , et al. Investigation on Volt – var Control Using CVR at Various Photovoltaic Penetration Levels [C] // 2014 IEEE North American Power Symposium (NAPS) ,2014: 1 –5.
- [27] Quijano D A , Feltrin A P. Assessment of Conservation Voltage Reduction Effects in Networks With Distributed Generators [C] // IEEE ,2015: 393 –398.
- [28] Bokharia , Raza A , Diazaguilo M , et al. Combined Effect of CVR and DG Penetration in the Voltage Profile of Low – voltage Secondary Distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2015 ,31(1) : 179 –182.
- [29] Wang Z , Chen B , WANG J , et al. Stochastic DG Placement for Conservation Voltage Reduction Based on Multiple Replications Procedure [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2015 ,30(3) : 1 –9.
- [30] Zhang C , Dai B , Wu T , et al. Model – based Volt/Var Optimization Using Advanced Metering Infrastructure in Distribution Networks [C] // Power Tech ,2015 IEEE Eindhoven ,2015: 536 –557.
- [31] Peskin M A , Powell P W , Hall E J. Conservation Voltage Reduction with Feedback From Advanced Metering Infrastructure [C] // 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition ,2012: 1 –8.
- [32] Belvin R C , Short T A. Voltage Reduction Results on a 24 kV Circuit [C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition ,2012 IEEE PES ,2012: 1 –4.
- [33] Dabic V , Siew C , Peralta J , et al. BC Hydro’s Experience on Voltage VAR Optimization in Distribution System [C] // 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition ,2010: 435 –441.
- [34] Yeh G , Gayme D F , Low S H. Adaptive VAR Control for Distribution Circuits With Photovoltaic Generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2012 ,27(3) : 1656 –1663.
- [35] Farivar M , Clarke C R , Low S H , et al. Inverter VAR Control for Distribution Systems with Renewables [C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications ,2011: 457 –462.
- [36] Farivar M , Neal R , Clarke C , et al. Optimal Inverter VAR Control in Distribution Systems with High PV Penetration [C] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting ,2012: 1 –7.
- [37] Neal R. The Use of AMI Meters and Solar PV Inverters in an Advanced Volt/Var Control System on a Distribution Circuit [C] // 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition ,2010: 1 –4.
- [38] 王同勋,薛禹胜. S. S. CHOI. 动态电压恢复器研究综述 [J]. 电力系统自动化 2007 ,31(9) : 101 –107.

作者简介:

戴诗朦(1992) 硕士研究生,研究方向为配电网电压无功;

孙 鸣(1957) 教授、博士,研究方向为电力系统继电保护及调度自动化;

刘俊勇(1963) 教授、博士,研究方向为配电网规划运行及电力市场研究。

(收稿日期: 2017 –05 –18)