

基于串联补偿的有源配电网综合调压技术

目前, 供电半径较长且负荷较重的线路末端普遍存在电压偏低的情况, 且电压频繁波动; 尤其分布式电源通过线路末端接入后, 其出力随机性和间歇性的特点使电压波动问题更为突出。传统的电压控制措施(如无功补偿、调节变压器分接头等)均无法满足电压调节的实时性与连续性要求。由于配电网线路中的等效电阻与电抗值基本相当, 二者均会带来一定的电压降落, 若采用固定电容实现串联补偿, 仅能补偿电抗中的压降; 若单纯采用基于电力电子的有源设备进行电压全补偿, 所需设备容量较大, 难以保证系统实现的经济性。提出了一种基于固定电容器与有源设备相结合的综合串联补偿技术, 通过固定电容器自适应调节电抗中的压降, 利用有源设备自动补偿电阻中的压降, 在有效抑制有源配电网电压波动、提高供电质量的基础上, 保证了系统实现的整体经济性。基于PSCAD仿真软件建立了含分布式电源的有源配电网系统仿真模型, 仿真结果证明了该方法的有效性。

马 骏 仇志华/中国石油大学(华东)信息与控制工程学院

0 引言

电压质量是衡量供电质量是否符合标准的一项重要指标^[1], 其质量的优劣直接关系到用电设备的安全经济运行和生产的正常运作, 而且随着社会的发展, 电网公司及电力用户对电压质量的要求也日益提高。然而, 配电网由于处于电网末端, 长期未得到足够的重视, 其建设和发展相对于输电网严重滞后^[2]。随着城乡经济的不断发展, 尽管已逐步实施农村电网改造计划, 但部分供电半径较大、负荷较重的配电线路末端电压偏低问题依然比较突出; 而分布式电源(Distributed Generator, DG)接入配电网

网末端, 由于DG的出力具有随机性, 会使负荷侧的电压波动问题更为突出^[3], 这也成为影响DG接入容量并限制其出力的关键因素之一。

传统的配电网电压调节方法主要有调节变压器分接头、调整并联无功补偿电容器组以及采用串联电容器进行补偿的方法, 其中调节变压器分接头最为常用。由于变压器调压只能改变电压的高低, 不能发出或吸收无功, 所以只能用于系统无功充裕时, 且变压器分接头并不能根据负荷变化而自动响应, 无法实现动态电压调节, 而目前变压器出口电压合格, 因线路上的压降过大, 导致负荷侧电压过低, 因此单纯依靠调节变压器分接头无法满足末端负荷电压调整的要求。调节并联无功补偿电容器的方法主要用于提升系统功率因数、减小系统网损, 而调节的连续性和实时性不能满足有源配电网电压波动的调节要求; 同时, 其在电压控制方面存在一定局限性, 低压补偿能力有限, 并不具备自适应的特点, 往往会引起重负荷时电压低、轻负荷时电压高的问题。采用串联电容器进行补偿可以起到改善辐射状配电线路沿线电压分布和减小电压跌落的作用, 并具有负荷自适应电压调节和实时响应的特点。串联补偿技术在国内外高压及以上输电网中得到越来越广泛的应用, 主要起到提高稳定极限、增强输送能力和调节潮流分配等作用。在欧美国家(如瑞典、美国和加拿大等)的中低压配电网(10 kV及以下)中, 串联补偿技术用于解决配电网电压问题也有



马 骏/硕士研究生

关键词/Keywords

串联补偿 ·
电压质量 ·
有源配电网 ·
有源设备 ·

国家自然科学基金面上项目(51177096), 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050213), 中国石油大学(华东)自主创新科研计划项目(R1305006A)。

八十多年的历史^[4-7]。由于自适应及控制简单等优点,固定串联电容器(Fixed Series Capacitor, FSC)相比可控串联电容器更具经济性^[8]。但是,该技术在国内外配电网中却极少应用。此外,配电线路的总长度长于输电线路,且线路分支线多、线径较小,这样导致配电网线路参数的电阻与电抗的比值较大,多数情况下大于1。但是FSC仅补偿了电抗上的压降,而无法补偿电阻上的压降,整体补偿效果有限。

此外,统一潮流控制器(United Power Flow Controller, UPFC)作为功能强大的FACTS设备,能够灵活控制系统潮流,有效提高输电系统的稳定性^[9]。同时,UPFC能够进行电压控制,可以用来解决配电网电阻较大而引起压降的问题。但其实现成本与其容量基本上呈线性关系,即容量越大,实现成本越高^[10],因此受到经济性的制约。

为有效解决配电网末端电压偏低,尤其适应DG大量通过线路负荷侧接入情况下的电压调节问题,本文结合FSC和有源设备调压的特点,提出一种综合串联补偿电压控制技术,实现了线路中电抗压降和电阻压降的一并补偿,能够有效改善有源配电网负荷侧的电压质量,且保证系统实现整体经济性;基于PSCAD软件建模仿真结果证明了所提方法的有效性。

1 固定串联补偿电压控制的基本原理

辐射状配电网网络的等效电路如图1所示。图中, U_S 和 U_R 分别为线路首端和末端电压; I_L 为线路电流; R_L 和 X_L 分别为线路的等效电阻和电抗; $\tilde{S}_R = P_R + jQ_R$ 分别为末端三相视在功率、有功和无功功率; φ_R 为功率因数角。在不加入FSC的情况下,首末端电压相量之间的关系如图2所示。

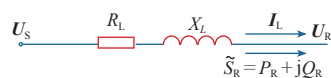


图1 未进行串联补偿电压控制时的系统等效电路

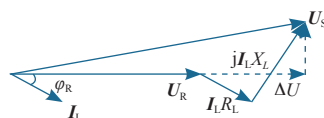


图2 未进行串联补偿电压控制时的首末端电压相量

若以 U_R 作为时间坐标轴的基准,即X轴,则有 $U_R^* = U_R$,由图2可得线路首末端电压差为

$$\Delta U = \frac{P_R R_L + Q_R X_L}{U_R} + j \frac{P_R X_L - Q_R R_L}{U_R} \quad (1)$$

由式(1)可知,线路上的阻抗及末端负荷大小是影响线路压降的主要因素。在长线路、重负荷的配电线路中,线路阻抗及负荷较大,会使线路首末端电压差变大,进而导致末端电压偏低。当线路中串入电容器 X_C 时,其等效电路与首末端电压相量关系如图3所示^[11]。

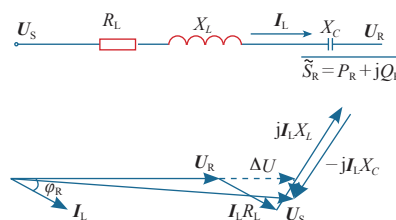


图3 经固定串联补偿电压控制后的等效电路与首末端电压相量关系

此时线路首末端的电压差为

$$\Delta U = \frac{P_R R_L + Q_R (X_L - X_C)}{U_R} + j \frac{P_R (X_L - X_C) - Q_R R_L}{U_R} \quad (2)$$

由式(2)可知,串联电容器补偿了线路的感抗,减小了电抗,相当于缩短了两个系统间电气距离,从而降低了输电线路的电压降。FSC在线路中相当于一个电压调节器,在任何情况下,它总能产生一个与线路电抗压降相反的电压,其值为

$$\Delta U_C = \sqrt{3} I_L X_C \sin \varphi + j \sqrt{3} I_L X_C \cos \varphi \quad (3)$$

串联电容器补偿的电压与流经电容器的负荷电流成正比,当FSC装置下游负荷越重时,串联电容器补偿的电压也就越大;而当负荷较轻或空负荷时,线路电流很小,其补偿的电压也随之减小,此效应称为串补的自适应电压调节,这也是FSC技术最大的特点和优势。但该技术无法有效补偿电阻中的压降,电压调整效果有限。

串联电容值的容抗 X_C 的确定方法为

$$X_C = \frac{\Delta U_{C_max}}{I_{C_max}} \quad (4)$$

式中, ΔU_{C_max} 为FSC在安装点处需补偿的最大电压; I_{C_max} 为流经的最大负荷电流。

2 综合串联补偿调压控制的基本原理

2.1 UPFC结构

UPFC总体上由并联侧变流器与串联侧变流器两大部分组成，二者通过直流侧电容相连接。从外特性上来看，二者组成了一个背靠背的电压源型变流系统（Back-Back Voltage Source Converter, B-BVSC），有功功率可在两个变流器之间双向流动，并联侧变流器可从系统吸收有功功率，通过直流侧电容经串联侧变流器再流向交流系统；也可以由串联侧变流器从系统中吸收有功功率，通过直流侧电容经并联侧变流器再流向交流系统。因此，UPFC具有强大的潮流控制能力，能够实现潮流灵活连续性调整。控制UPFC补偿电压的相位与线路末端电压相位相同，并调整输出电压幅值可实现电压的全补偿，但这种调压方式中UPFC的补偿容量较大，因此经济性不好。

2.2 综合串联补偿调压控制的基本原理

FSC调压原理在上文已经介绍，由式（2）可知，串联电容器可以有效地减小首末端电压差，补偿末端电压，并改善电压质量。由图3可知，FSC仅能补偿电抗中的压降，而不能补偿电阻中的压降，然而在配电网中电阻与电抗的比值较大，甚至两者相当，仅使用FSC补偿时补偿效果有限，可能出现补偿后的末端电压仍达不到标准的情况。

针对上述情况，本文提出综合串补调压的方法，即利用FSC与可控的有源电源综合补偿的方式，在串入FSC的基础上引入UPFC，控制其补偿的电压与线路电流同相位，补偿线路中电阻上的压降实现全补偿，其电路和相量图如图4、图5所示，其中 U_{SCR} 为UPFC产生的补偿电压。

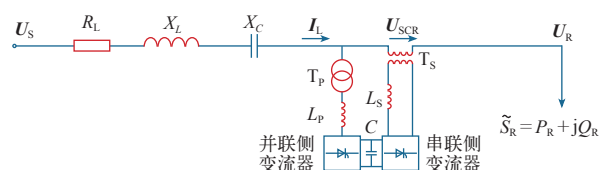


图4 综合补偿方式电路

由图5可得，首末端的电压差为

$$\Delta U = I_L [R_L + j(X_L - X_C)] - U_{SCR} \quad (5)$$

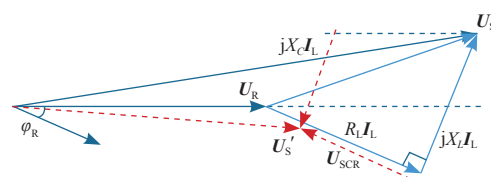


图5 综合补偿方式相量图

其中

$$U_{SCR} = \frac{(U_{SCR})^2}{P_{SCR}} I_L \quad (6)$$

$$I_L = \frac{P_R - jQ_R}{U_R^*}$$

以 U_R 作为时间坐标轴的基准，即X轴，则有 $U_R^* = U_R$ ，将式（6）代入式（5）可得

$$\Delta U = \frac{P_R \left[R_L - \frac{(U_{SCR})^2}{P_{SCR}} \right] + Q_R (X_L - X_C)}{U_R} + j \frac{P_R (X_L - X_C) - Q_R \left[R_L - \frac{(U_{SCR})^2}{P_{SCR}} \right]}{U_R} \quad (7)$$

由式（7）可知，这种补偿方式相当于在串入容抗值 X_C 的基础上，再串联一个阻值为 $-(U_{SCR})^2/P_{SCR}$ 的电阻，从而实现全补偿的效果。综合串联补偿的方法不仅实现了对线路中电感上压降的补偿，同时通过UPFC产生与线路电流同向的补偿电压，实现了对线路中电阻上压降的补偿，从而达到全补偿的效果，可以有效缓解由长线路、重负荷引起的低电压问题。

在系统侧负荷较小，且通过负荷侧接入的DG出力较大的情况下，可能会导致功率倒送，从而引起末端电压升高的情况。此时可利用UPFC产生反向补偿电压，将线路电压控制在要求范围之内。而DG出力具有随机性和间歇性的特点，使线路末端的等效负荷也随之变化，由式（1）可见，该出力特性会直接影响线路上的电压降落，导致末端的电压波动问题更为突出，这已成为影响DG接入及其限制出力的关键因素之一。通过本文提出的综合串联补偿电压控制技术，能够很好地解决该问题。因此，综合串联补偿调压方法能够实现双向调压且有效抑制电压波动问题。同时，采

用综合串联补偿方式时, UPFC的容量较单纯使用UPFC补偿时明显减小, 从而降低了实现成本, 具有经济性。

3 仿真验证

本文基于PSCAD仿真软件建立了含有DG的有源配电网辐射状线路模型, 如图6所示。其中电源电压为110 kV, 线路的电压等级为10 kV, 线路末端经降压变压器降至380 V。线路末端接入光伏电源, 且将DG的稳态出力视为负的负荷, 用与线路

末端电压同向的电流源等效代替, 其中UPFC用可控电压源等效代替。调节线路负荷大小, 使末端电压下降至不同情况, 仿真验证不同串联补偿方式在低电压情况下的补偿效果。在系统侧负荷较小而DG出力较大的情况下, 会引起电压升高的情况, 为验证综合串联补偿电压控制技术的双向调压特性, 去掉图6模型中10 kV母线上的其他分支馈线, 并减小系统容量。在DG出力较大而引起电压升高的情况下, 验证不同串联补偿方式对电压的调节效果。为方便对比, 下面分三种情况进行仿真验证。

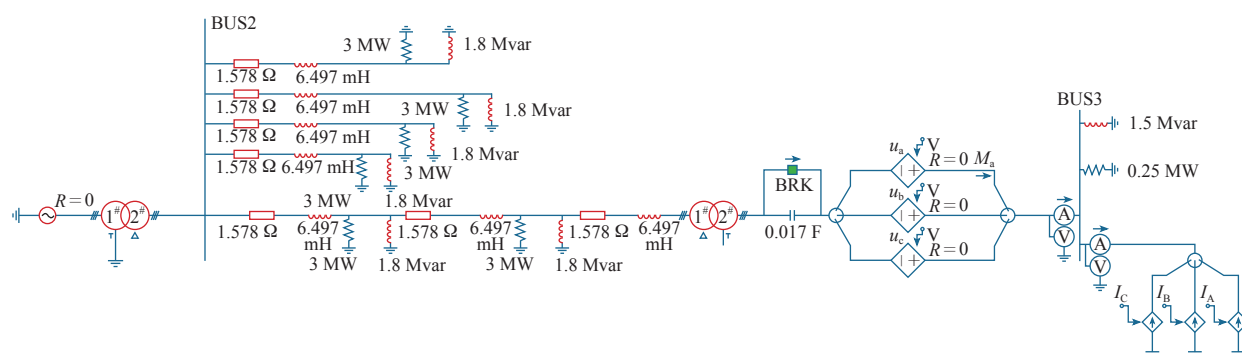


图6 有源配电网辐射状线路模型

3.1 采用固定电容器实现串联补偿电压控制

将参数导入式(4)后, 得出本模型串入的电容值为0.017 F。在不同末端电压的情况下, 其补偿后的电压如表1所示, 最后一行是DG出力为660 kW且引起过电压时, 加入FSC的补偿效果。

表1 仅FSC时补偿前后的末端电压
(单位: kV)

补偿前线路末端线电压	补偿后线路末端线电压
0.26	0.322
0.27	0.334
0.28	0.343
0.29	0.353
0.30	0.355
0.31	0.364
0.32	0.367
0.33	0.367
0.34	0.372
0.35	0.37
0.36	0.376
0.42	0.395

由表1可知, 在末端电压为0.29~0.36 kV时, 通过串联FSC的方法, 可以将电压提升到规定范围内(220 V单相供电电压偏差为标称电压的+7%, -10%^[12]), 可见在电压跌落不严重的情况下, 串联电容器可以有效地缓解电压偏低的情况。然而, 当线路负荷较重并使末端电压低至0.26~0.28 kV时, 仅串联电容器虽使电压得到提升, 但由于只补偿了线路中电抗的损耗, 而此时电阻中的损耗较大且没有得到补偿, 导致仍不能使其达到标准。对于DG出力较大而引起电压升高的现象, 单纯使用FSC进行电压控制可以使末端电压在一定程度上有所降低, 验证了FSC具有双向调压的特性, 但并不能完全解决这一问题。

3.2 仅采用有源设备进行电压的全补偿

仅采用UPFC补偿时, 控制补偿电压的相位使其与线路末端电压相同, 其幅值为标准电压与设备安装处前端电压之间的差值, 可实现全补偿,

其补偿容量及补偿效果如表2所示,其中最后一行是DG出力为660 kW时的补偿效果,此时去掉了10 kV母线分支馈线并减小了系统容量。末端电压下降至0.27 kV,在0.3 s时投入UPFC对线路电压进行补偿,线路末端电压有效值与UPFC补偿电压的仿真情况如图7所示。

表2 不同末端电压情况下UPFC的补偿效果

补偿前末端线 电压/kV	补偿后末端线 电压/kV	$\Delta U/\text{kV}$	UPFC补偿 电压/kV	UPFC的补偿 容量/kV·A
0.26	0.369	0.109	0.121	187.03
0.27	0.371	0.101	0.111	153.07
0.28	0.373	0.093	0.101	118.8
0.29	0.375	0.085	0.091	96.62
0.3	0.377	0.077	0.081	67.38
0.31	0.378	0.068	0.071	54.18
0.32	0.378	0.05	0.061	37.35
0.33	0.379	0.049	0.051	25.034
0.34	0.380	0.04	0.041	15.12
0.35	0.380	0.03	0.031	7.63
0.36	0.381	0.021	0.021	3.88
0.420	0.3815	-0.039	-0.04	57.158

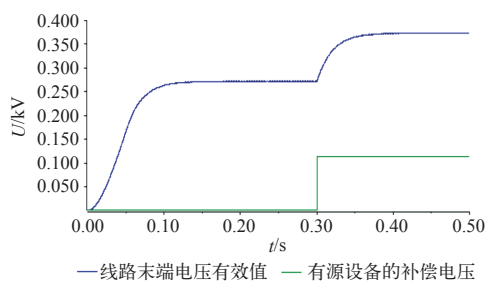


图7 仅UPFC补偿末端电压变化情况

由表2可以看出,通过有源设备的补偿后,末端电压过低及过高的情况得到了有效解决,具有电压双向调节特性,但有源设备的补偿容量较大,成本较高。

3.3 综合串联补偿电压控制技术

在前文基础上,串入UPFC进行全补偿,此时UPFC的补偿电压相位与线路末端电流一致,使其补偿线路中电阻上的损耗,从而实现全补偿。为达到与表2相同的补偿效果(即经两种补偿方案补偿后末端电压相同),此方案UPFC的补偿容量如表3所示,最后一行是DG出力为660 kW且引起过电压时,加入FSC的补偿效果。当末端电压下降至

0.27 kV时,在0.2 s投入FSC,在0.4 s加入UPFC时的末端电压变化情况如图8所示。

表3 综合补偿效果

补偿前末端线 电压/kV	补偿后末端线 电压/kV	$\Delta U/\text{kV}$	UPFC补偿 电压/kV	UPFC的补偿 容量/kV·A
0.26	0.369	0.109	0.043 5	67.44
0.27	0.371	0.101	0.032 9	45.28
0.28	0.373	0.093	0.026	30.48
0.29	0.375	0.085	0.020 6	21.82
0.30	0.377	0.077	0.019 9	16.52
0.31	0.378	0.068	0.013 9	10.62
0.32	0.378	0.05	0.011	6.71
0.33	0.379	0.049	0.010 6	5.18
0.34	0.380	0.04	0.009 2	3.38
0.35	0.380	0.03	0.01	2.46
0.36	0.381	0.021	0.004 7	0.865
0.420	0.381 5	-0.039	-0.011	15.72

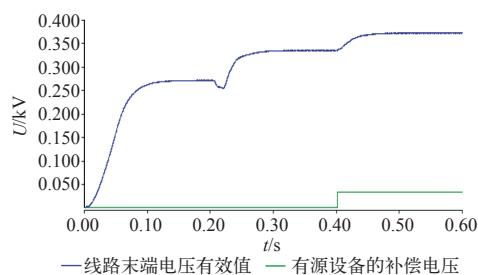


图8 综合补偿末端电压变化情况

通过表1与表3对比可知,使用综合串联补偿电压控制技术时,在电压严重降低或提升的情况下仍可将其补偿到规定范围之内。通过表2与表3对比可知,与仅使用有源设备补偿的方法相比,为达到相同的补偿效果,使用综合串联补偿电压控制技术时,有源设备的补偿容量得到了明显的降低,这主要是由于本方法中有源设备仅需补偿电阻的损耗,从而缩减了成本。

通过理论与仿真分析可知,仅使用固定串联补偿时,虽然可以缓解电压跌落及由于DG出力较大引起电压过高的问题,但在电压跌落严重的情况下并不能将其提高到规定范围内,然而电压跌落严重的情况普遍存在,特别是在山村农网,仅采用有源设备进行补偿虽可以将电压补偿到规定范围内,能够实现双向调压,但有源设备的补偿容量大,成本也高,不能保证经济性;本文采取

综合串联补偿的方式,既可以解决电压跌落及提升的问题,又可以降低成本,从而有效又经济地提高电压质量。

4 结束语

随着城乡经济的不断发展,在供电半径较大、负荷较重的配电线路上,末端电压过低的现象日趋明显;而DG接入配电网末端,由于其出力的随机性,导致负荷侧的电压波动问题更加突出,电压问题亟待解决。

本文根据配电网的参数特点,分析了影响电压降落的因素;结合固定串联补偿和有源补偿的特点,提出了基于固定电容器与有源设备相结合的综合串联补偿技术,可以有效弥补传统补偿方式的不足,提高电压质量。仿真结果证明了采用固定电容器与有源设备相结合的综合串联补偿技术的有效性,为提高电压质量进行了有益的探索。

在能源枯竭与环境污染问题日益严重的今天,DG入网已越来越受到重视,必将得到越来越广泛的应用。本文提出的电压控制方法,能够较好地解决上述存在的电压问题,具有重要的理论研究和实际应用价值,后续尚需针对装置的安装位置、安装容量及装置的保护措施等方向进行深入研究。

参考文献

- [1] 肖湘宁,徐永海.电能质量问题剖析[J].电网技术,2001,25(3):66-69.
- [2] 徐丙垠,李天友,薛永端.智能配电网与配电自动化[J].电力系统自动化,2009,33(17):38-41.
- [3] 裴玮,盛鹏,孔力,等.分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):152-157.

- [4] Sherif, Omar Faried, Saleh Aboreshaid. Stochastic evaluation of voltage sags in series capacitor compensated radial distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3).
- [5] Morgan L, Barcus J M, Ihara S. Distribution series capacitor with high-energy varistor protection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1413-1419.
- [6] 唐勇,李乃湖,田立军,等.可控串联电容次同步谐振现象的动态模拟研究[J].电网技术,1998(11):24-28.
- [7] Lat M V, Kundu D, Bonadie G. Overvoltage protection scheme for series capacitor banks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1459-1465.
- [8] 卓谷颖,江道灼,梁一桥,等.改善配网电压质量的固定串补技术研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):61-67.
- [9] 马凡,谷双魁,刘黎明,等.UPFC控制及动态特性实验研究[J].电网技术,2007,31(17):64-69.
- [10] 仇志华.基于UPFC的自愈配电网及其潮流优化控制技术研究[D].济南:山东大学,2012.
- [11] Miske S A. Considerations for the application of series capacitors to radial power distribution circuits [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2).
- [12] GB/T 12325—2008 电能质量 供电电压偏差[S].

(收稿日期:2015-08-15) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告