

基于分布式发电与 SVG 优化配置的调压方法

白 茜, 李 鹏

(华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 将静止无功发生器(SVG)引入到含有分布式发电的配电网中来调节电压。基于链式均匀配电网、恒功率静态负荷模型和分布式电源的功率模型,采用叠加原理,分别考虑系统电源和分布式电源对配电网电压的作用,给出了分布式发电引入配电网后电压分布的计算方法。通过该方法,计及允许偏差,推导出分布式发电投入与退出后的电压调节理论判据。在分布式发电投入与退出 2 种情况下,分别以电压处于允许电压偏差范围内为目标和以降低线损为目标,计算出了 SVG 的接入位置和容量,最后利用分布式发电与 SVG 优化配置调节配电网电压。仿真算例表明:该方法计算简便、中间步骤少、效果明显。

关键词: 配电网; 分布式发电; 电压调节; 优化配置; 静止无功发生器

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)07-0062-04

0 引言

分布式发电 DG(Distributed Generation)是指功率在几十千瓦至十兆瓦范围内,模块式的、分布在负荷附近的清洁环保的发电设施,能够经济、高效、可靠地发电^[1-3]。DG 的引入^[4-11]可能引起馈电线路的过电压或者欠电压,基于此,考虑将静止无功发生器 SVG(Static Var Generator)引入到含有 DG 的配电网中来调节电压^[6-10]。

DG 引入配电网后的电压调节既要考虑 DG 投入与轻载的情况,又要考虑 DG 退出与重载的情况。基于均匀配电网、恒功率静态负荷模型和 DG 的功率模型,给出了含有 DG 的配电线路的电压分布简化算法,并通过此算法推导出了电压调节的条件,最后利用 SVG 既能提供无功功率又能消耗无功功率的特性,将其与 DG 相互配合来调节配电网电压,以降低线损为目标,研究 DG 与 SVG 的优化配置,最后在算例中对提出的方法进行了验证。

1 电压分布简化计算

以 10 kV、放射状链式结构的中压配电网为例进行研究,为便于研究,将系统电源等效为电压源且保持不变;将 DG 等效为电流源;假设负荷三相对称;因电压等级较低,配电线路长度较短,忽略线路电容和三相线路间的互感;所有线路阻抗均折算到系统电压侧。这里利用叠加原理来计算 DG 引入后的电压分布。

1.1 模型建立

一条均匀配电线路如图 1 所示, n 个负荷均匀

分布在线路中,单个负荷大小为 $P_L + jQ_L$, R 和 X 分别为均匀配电线路中相邻两负荷节点之间的电阻和电抗值(标么值), U_N 为线路中的额定电压。

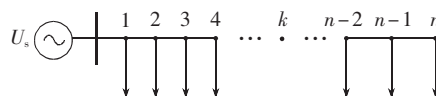


图 1 均匀配电线路

Fig.1 Uniform distribution line

在上述配电线路中引入 DG(如图 2 所示),其位置在任意负荷节点 m 处,配电线路的参数不变,DG 的容量大小为 $P_{DG} + jQ_{DG}$ 。

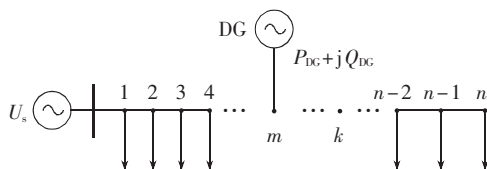


图 2 含有 DG 的均匀配电线路

Fig.2 Uniform distribution line with DG

当系统电源单独作用时,由于 DG 等效为电流源,根据叠加原理,将其开路,如图 1 所示。

当 DG 单独作用时,由于系统电源等效为电压源,根据叠加原理,将其短路,如图 3 所示。

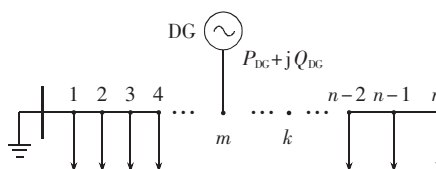


图 3 DG 单独作用的均匀配电线路

Fig.3 Uniform distribution line with DG only

1.2 电压分布计算

根据所建模型,基于电路上的叠加原理,分别考

考虑系统电源对配电线路的作用和 DG 对配电线路的作用,即将图 2 分为图 1 和图 3 来分析,以计算含有 DG 的配电线路上的电压分布。

参见图 1,设线路始端电压为 U_0 ,利用均匀配电线路的特性^[12],未考虑 DG 作用时,任一点 k 处的电压 U_k 为

$$U_k = U_0 - \Delta U_{sk} = U_0 - \frac{1}{2}k(2n-k+1)A \quad (1)$$

式中 $A = (RP_L + XQ_L) / U_N$,下同; ΔU_{sk} 为系统电源单独作用时的电压损耗; $k \in [1, n]$ 。

将 DG 引入上述表达式中,则含有 DG 的配电线路的电压分布为

$$U_k = U_0 - \Delta U_k = \begin{cases} U_0 - k(2n-k+1)A/2 + kB, & k \in [1, m] \\ U_0 - k(2n-k+1)A/2 + mB, & k \in [m+1, n] \end{cases} \quad (2)$$

式中 $B = (RP_{DG} + XQ_{DG}) / U_N$,下同; ΔU_k 为系统电源和 DG 共同作用时的电压损耗; $k \in [1, n]$ 。

式(2)中,对于某一条确定的配电线路而言,当 DG 的容量和接入地点都确定时,即可通过此式获得电压分布。

2 电压调节

2.1 电压调节判据

2.1.1 DG 退出后的判据

DG 并网运行在配电线路中,各点的电压都在额定范围内(电压偏差为 $\pm 5\%$)。而当系统重载且 DG 退出时可能引起电压越下限。

根据式(1),当 $U_k < 0.95$,需对电压进行调节。由于 U_k 是单调递减的,则当线路末端电压 $U_n < 0.95$ 时,末端电压将会越下限,即

$$A > \frac{2U_0 - 1.9}{n(n+1)} \quad (3)$$

线路中的电压将超出额定范围,需无功补偿来调压。

2.1.2 DG 投入后的判据

考虑负荷一般为感性且忽略配电线路对地电容时,DG 并网运行时配电系统的电压可能越上限也可能越下限。

根据式(2),对于 DG 安装点 m 之后的线路, m 点为电压最高点,只要 m 点不越上限,则其他各点均不会越上限;而对于 DG 之前的线路,线路始端或者 m 点处为电压最高点,这里假设线路始端电压处于额定范围内,只要最高点 m 处不越上限,则其他各点均不会越上限。所以,考虑上述 2 种情况,当 m 处电压 $U_m > 1.05$ 时,电压会越上限,即

$$B > \left(n - \frac{m}{2} + \frac{1}{2}\right)A + \frac{1}{m}(1.05 - U_0) \quad (4)$$

当电压越下限时,考虑线路中电压最低点。经过分析,对于 DG 安装点之后的线路,线路末端 n 点为电压最低点;对于 DG 之前的线路,DG 安装处 m 点或者 $(n+1/2-B/A)$ 点为电压最低点。综合上述 2 种情况,当线路末端电压 $U_n < 0.95$ 时,即

$$B < \frac{n(n+1)}{2m}A - \frac{1}{m}(U_0 - 0.95) \quad (5)$$

或者 $(n+1/2-B/A)$ 点处电压 $U_{n+1/2-B/A} < 0.95$ 时,即

$$\left(n - \frac{1}{2} + \frac{B}{A}\right)^2 > \frac{2U_0 - 1.9}{A} \quad (6)$$

电压会越下限。

当满足不等式(4)(5)或(6)时,线路电压将超出额定范围,需要对其进行调节。

2.2 SVG 的位置及容量

2.2.1 投入到不含 DG 的配电线路中

如按提高运行电压确定补偿容量,则补偿位置、容量计算如下:

$$U_0 - \Delta U_{sn} + iQ_{c0}X \geq 0.95$$

即

$$Q_{c0} \geq \frac{\Delta U_{sn} + 0.95 - U_0}{iX} \quad (7)$$

其中, i 为任意一点; Q_{c0} 为 SVG 所提供的容量。

当按降低线损确定补偿位置及容量时,由于此配电线路的负荷为均匀分布的,为使线损下降率最大,此时的补偿可以考虑采用单点补偿或是两点补偿^[12]。单点补偿时,补偿地点应装设在距线路首端为线路全长的 $2/3$ 处,补偿容量为全线所需容量的 $2/3$,线损下降率为 88.9% ;两点补偿时,补偿地点应装设在距线路首端为全线路的 $2/5$ 和 $4/5$ 处,容量都为全线所需容量的 $2/5$,线损下降率为 96% 。

2.2.2 投入到含有 DG 的配电线路中

由于 DG 的引入,使得补偿位置、容量计算略有不同,按满足运行电压质量确定补偿容量,则当电压超上限时,

$$U_0 - \Delta U_m - iQ_{c1}X \leq 1.05$$

即

$$Q_{c1} \geq \frac{U_0 - \Delta U_m - 1.05}{iX} \quad (8)$$

其中, Q_{c1} 为电压超上限时 SVG 所需补偿的无功功率。

当电压越下限时,

$$U_0 - \Delta U_n + iQ_{c2}X \geq 0.95$$

即

$$Q_{c2} \geq \frac{\Delta U_n + 0.95 - U_0}{iX} \quad (9)$$

其中, Q_{c2} 为电压越下限时 SVG 所需补偿的无功功率。

当按降低线损确定补偿位置及容量时,基于单点补偿和两点补偿相同的原理,经过计算,在 m 点之前补偿,则有

$$l_c = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{Q_{DG}}{nQ_L}\right), Q_c = \frac{2}{3}(nQ_L - Q_{DG}) \quad (10)$$

在 m 点之后补偿,有 2 组解:

$$l_c = m, Q_c = 2nQ_L \quad (11)$$

$$l_c = m + 2L/3, Q_c = 2nQ_L/3 \quad (12)$$

其中, l_c 、 Q_c 分别为补偿点位置和所需容量; L 为整条线路长度。

对于式(10),当 $Q_{DG} \geq Q_L$ 时, $l_c \leq 0$, 不予采用; 对于式(12), 只有当 DG 位于线路的 $1/3$ 之前时, 才有合理性; 而对于式(11)则没有限制, 通用性高。式(10)~(12)对于电压超上限或是越下限同样适用, 只不过对于超上限的情况, 需要 SVG 吸收无功, 而越下限的情况, 需要 SVG 发出无功。

2.3 DG 与 SVG 优化配置调节电压

优化配置的任务是确保电压处于额定范围内的基础上, 再考虑降低线损。根据电压调节的判据和 SVG 的优化位置及容量(DG 退出后的优化配置以单点补偿为例), 优化配置流程如图 4、图 5 所示。

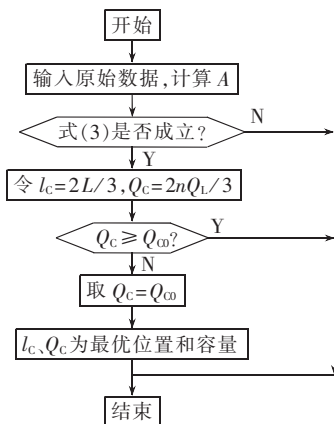


图 4 DG 退出后的配置流程图

Fig.4 Flowchart of allocation optimizing without DG

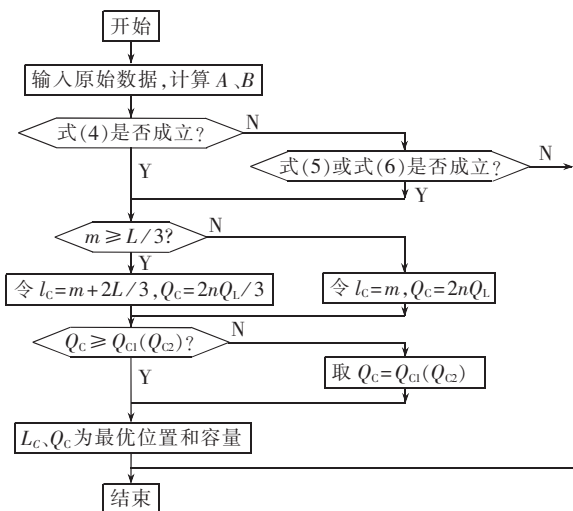


图 5 DG 投入后的优化配置流程图

Fig.5 Flowchart of allocation optimizing with DG

3 仿真分析

3.1 仿真模型

依照图 2 所建含有 DG 的配电线路的模型, 一条 10 kV 配电线路, 负荷节点个数 $n=12$, $r=0.082 \Omega$, $x=0.247 \Omega$ (r, x 分别为相邻两负荷节点之间的电阻、电抗的有名值)。有功负荷 $P_L=666.67$ kW, 无功负荷 $Q_L=300$ kvar, 额定电压 $U_N=1.0$ p.u., 功率基值为

10 MV·A, 电压基值为 10 kV。DG 提供的有功 $P_{DG}=2$ MW, 功率因数 $\lambda=\cos \varphi=0.95$ (滞后)。

3.2 仿真结果

基于以上数据, 根据 DG 投入和退出后的优化配置流程, 对含 DG 的配电网电压进行调节。系统重载时, 满负荷运行, 图 6 为重载时 DG 作用和退出后的电压分布比较图(1 为无 DG 作用, 2 为 DG 在 $n=4$ 处投入, 3 为 DG 在 $n=8$ 处投入)。由图可见, DG 作用时, 电压均在额定范围内, 一旦 DG 退出, 将会使得电压越下限, 根据所提方法, 将 SVG 投入, 电压调节结果如图 7 所示。图 8 是当系统负荷为重载的 90% 时, 电压处于额定范围, 当 DG 投入后由于初值的变化, 使得电压越下限, 投入 SVG 后的结果如图所示(1 为无 DG 投入, 2 为 DG 投入, 3 为经过调节, 图 9 同)。系统轻载时, 为重载时的 30%, 此时 DG 的投入将会引起电压的超上限, 投入 SVG, 调节结果如图 9 所示。

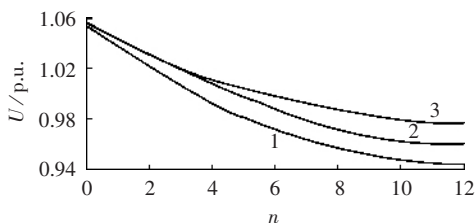


图 6 DG 退出前后的电压分布比较图

Fig.6 Comparison of voltage distribution between with and without DG

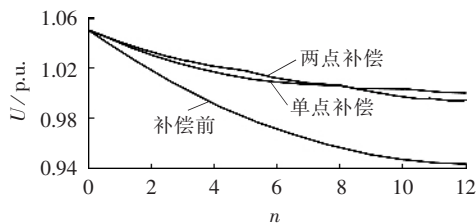


图 7 DG 退出后的电压调节

Fig.7 Voltage regulation without DG

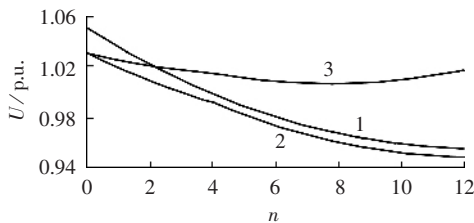


图 8 DG 投入后电压越下限的调节

Fig.8 Under-voltage regulation with DG

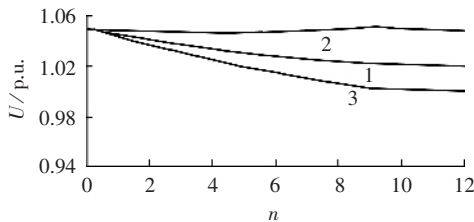


图 9 DG 投入后电压超上限的调节

Fig.9 Over-voltage regulation with DG

4 结论

a. 基于叠加原理,给出了含有DG的配电网电压分布的简化计算方法,该方法计算简便,物理意义清晰,准确性高。此外,该方法易推广到多个DG接入的情况,经过多次叠加即可得到其电压分布表达式。

b. 考虑了DG投入与退出时配电网电压的变化,推导出了需电压调节的判据,为进一步的调压打下基础。

c. 在含有DG的配电网中,分别以电压为目标和以降低线损为目标计算出了SVG的补偿容量和地点。

d. 满足配电网电压处于额定范围内的条件下,再考虑降低线损,最后给出了DG与SVG优化配置调节电压的流程,仿真结果表明该方法显著有效、易于编程,并具有良好的通用性及实用性。

参考文献:

- [1] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
WANG Zhi-qun,ZHU Shou-zhen,ZHOU Shuang-xi,et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):56-60.
- [2] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(1):53-58.
WANG Zhi-qun,ZHU Shou-zhen,ZHOU Shuang-xi,et al. Study on location and penetration of distributed generations[J]. Proceedings of the EPSA,2005,17(1):53-58.
- [3] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化,2001,25(6):53-56.
LIANG Cai-hao,DUAN Xian-zhong. Distributed generation and its impact on power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(6):53-56.
- [4] 赵豫,于尔铿. 电力零售市场研究:(六)分散式发电对电力系统影响[J]. 电力系统自动化,2003,27(15):25-29.
ZHAO Yu,YU Er-keng. 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):25-29.
- [5] 丁明,王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):31-36.
DING Ming,WANG Min. Distributed generation technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(7):31-36.
- [6] JENKINS N,ALLAN R,CROSSLEY P,et al. Embedded generation[D]. London:Institution of Electrical Engineers,2000.
- [7] IYER H,RAY S,RAMAKUMAR R. Voltage profile improvement with distributed generation[C]//2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco,USA:IEEE,2005:2977-2984.
- [8] MASTERS C L. Voltage rise,the big issue when connecting embedded generation to long 11kV overhead lines[J]. IEE Power Engineering Journal,2002,16(1):5-12.
- [9] DAI C,BAGHZOUZ Y. On the voltage profile of distribution feeders with distributed generation[C]//Proc 2003 IEEE/PES Summer Meeting. Piscataway,NJ,USA:IEEE,2003:13-17.
- [10] KOJOVIC L. Impact of DG on voltage regulation[C]//Proc 2002 IEEE/PES Summer Meeting. Piscataway,NJ,USA:IEEE,2002:21-25.
- [11] 胡安民. 架空电力线路实用计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [12] 苑舜,韩水. 配电网无功优化及无功补偿装置[M]. 北京:中国电力出版社,2003.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

白茜(1982-),女,河北保定人,硕士研究生,研究方向为电能质量分析和分布式发电(E-mail:teatoyou@126.com);

李鹏(1965-),男,河北保定人,副教授,博士,主要从事电能质量分析与控制、分布式发电、电力电子技术在电力系统中的应用、先进控制理论和数字信号处理等方面的研究(E-mail:ncepulp@263.net)。

Voltage regulation based on allocation optimization of distributed generation and SVG

BAI Qian,LI Peng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and

Control under Ministry of Education,North China Electric Power University, Baoding 071003,China)

Abstract: SVG(Static Var Generation) is introduced to distribution network with distributed generation for voltage regulation. A calculation method of voltage profile for distribution system with distributed generation is proposed,which is based on the uniform distribution network,applies the static load model with constant power and the distributed source model,adopts the superposition theorem,and considers the effects of system source and distributed source on the voltage of distribution network respectively. With the consideration of the allowable voltage deviation,the voltage regulation criterions for distribution network with and without distributed generation are deduced by this simplified method. The capacity and location of SVG are calculated respectively with voltage and line loss as its objective. The allocation optimization of distributed generation and SVG for voltage regulation is presented. Simulative results show that the method is simple and effective.

This program is supported by the Important Research Project Fund of North China Electric Power University,China(200613003).

Key words: distribution network; distributed generation; voltage regulation; allocation optimization; SVG