

DOI: 10.7667/PSPC151732

基于二分法的本地控制改善含分布式电源配电网电压质量

刘健¹, 尹海霞², 尚海仓², 魏昊焜^{1,2}

(1. 陕西省电力科学研究院, 陕西 西安 710054; 2. 西安理工大学自动化学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了改善含分布式电源配电网的电压质量并避免控制策略对通信系统的依赖, 提出一种基于本地控制的分布式电源控制方法。根据分布式电源并网点的实时电压采集值, 控制相应分布式电源的有功出力 and 无功出力适当增大或减小, 结合控制效果并采用二分法反复调节控制量, 最终将并网点电压控制在电压偏差允许范围内。在对分布式电源的本地控制中, 在有功功率最大功率跟踪的前提下, 优先利用逆变器的剩余容量进行无功功率调节, 若仍不奏效再适当削减有功功率输出。密切监视分布式电源的运行环境, 一旦条件允许则及时增大有功功率输出以最大限度地利用自然资源。以 IEEE33 节点的配电网为例, 对所建议的方法进行了分析和验证。结果表明了所建议的控制方法的可行性和有效性, 对含分布式电源配电网的电压质量的改善效果明显。

关键词: 配电网; 分布式电源; 本地控制; 电压质量; 二分法

Voltage performance improvement by dichotomy based local control for power distribution networks with distributed generation

LIU Jian¹, YIN Haixia², SHANG Haicang², WEI Haokun^{1,2}

(1. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To improve the voltage quality of distribution network with Distributed Generations (DG) and make the control independent of the communication system, a local control approach of DGs is put forward. According to the voltage of PCC, the active and reactive power of the corresponding DG are regulated to increase or decrease, the regulation is committed repeatedly with the magnitude of control adjusted based on a dichotomy process so as to make the voltage of PCC of the corresponding DG within the restriction of voltage deviation. In the suggested local control process, the regulation of the reactive power based on the residual capacity of the inverter with MPPT is of priority. The active power of a DG is decreased properly when it is necessary. The condition is monitored in real time to increase the active power output of the DG in time so as to utilize the nature resources as much as possible. The IEEE-33 system is used as an example to verify the proposed control method, showing that its feasibility and the voltage quality of the distribution network with distributed generations can be improved effectively.

Key words: distribution networks; distributed generation; local control; voltage performance; dichotomy

0 引言

由于全球能源供应紧张, 发展新能源已成为全球研究的热点。其中分布式发电得到飞速发展。随着接入电网的分布式电源容量的提高, 其对电网的影响也越来越大。分布式电源可以支撑电网电压^[1], 但大规模的分布式发电接入电网, 可能会引起并网点

也即公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)电压越限^[2-5]。

文献[6]从电力系统功率传输理论的角度分析了光伏发电系统并网点电压升高的原因。主要对光伏发电系统基于有功功率和无功功率的电压调整原理及调整策略进行了研究, 提出了基于瞬时电压、电流控制的动态电压调整策略。文献[7]分析了单个光伏电源接入时对电压分布的影响, 及过电压条件下的可接入容量。文章中将低压网络等效为有考虑

多个 DG 和负荷沿线分布的情况。文献[8]针对传统的配电网无功优化调节手段离散化, 将风电场作为连续的无功调节手段参与配电网无功优化。提出了基于量子粒子群算法(QPSO)的无功优化方法, 有效地避免了种群早熟等问题。文献[9]将滤波及无功补偿功能融入光伏电站逆变器中, 实现有功并网、谐波抑制、无功补偿及电压补偿等多功能复用。提出了一种基于逆变器动态剩余容量的无功分配策略, 实现了光伏规模化并网的电能质量复合治理。

文献[10]根据光伏并网系统出力的间歇性、不确定性, 总结了光伏并网系统对电能质量的影响。以控制方法及结构的不同为依据, 归纳了系统抑制谐波问题与电压质量的方法。提出改善电能质量时需考虑天气环境、负载、实际容量、系统类型等因素。

文献[11]提出基于瞬时电压幅值的动态无功电流电压跌落补偿策略, 并从电力系统功率传输理论的角度分析了光伏发电系统 PCC 电压跌落的电压补偿原理, 并网逆变器通过无功功率对 PCC 电压跌落进行补偿。但文献[11]只是用无功动态补偿, 并没有有功无功功率综合控制, 来抬高电压。

由以上文献可以看出, 在改善电能质量问题上, 大多数的研究并没有考虑去主动控制 DG 的无功出力。针对这种情况, 本文提出分布式电源本地控制方法, 采用二分法控制相应分布式电源的有功、无功出力, 来改善并网点电压质量。并采取了无功功率输出优先调节和有功功率输出充分利用的原则。

1 分布式电源本地控制及对电压偏差的影响

1.1 分布式电源出力对配电网电压的影响

如图 1 所示为含分布式电源的配电网。0 号节点代表配电母线, R_0+jX_0 代表主电源侧系统阻抗, R_k+jX_k 代表第 k 段馈线的等值阻抗, $P_{L,k}+jQ_{L,k}$ 代表第 k 个节点的负荷功率, $P_{G,k}+jQ_{G,k}$ 代表第 k 个节点上的分布式电源的有功功率和无功功率。

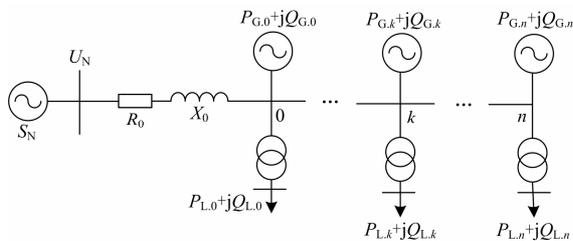


图 1 含分布式电源的配电网模型

Fig. 1 A distribution network with distributed generation (DG)

以 k 点为例, 分布式电源接入配电网后, k 点电压偏差为

$$\Delta U_k \% = - \left\{ \frac{\sum_{i=0}^k \left[R_i \sum_{k=i}^n P_{L,k} + X_i \sum_{k=i}^n Q_{L,k} \right]}{U_N^2} - \frac{\sum_{i=0}^k \left[R_i \sum_{k=i}^n P_{G,k} + X_i \sum_{k=i}^n Q_{G,k} \right]}{U_N^2} \right\} \times 100\% \quad (1)$$

第 k 节点的分布式电源的有功和无功出力分别增加 $\Delta P_{k,G}$ 和 $\Delta Q_{k,G}$ 后, 对节点 k 电压的改变 $\Delta u_{k,G}$ 为

$$\Delta u_{k,G} = \sum_{i=0}^k (R_i P_{k,G} + X_i Q_{k,G}) \quad (2)$$

若分布式电源以单位功率因数接入电网时, 其只发有功功率, k 点电压偏差为

$$\Delta U_k \% = - \left\{ \frac{\sum_{i=0}^k \left[R_i \sum_{k=i}^n P_{L,k} + X_i \sum_{k=i}^n Q_{L,k} \right]}{U_N^2} - \frac{\sum_{i=0}^k \left[R_i \sum_{k=i}^n P_{G,k} \right]}{U_N^2} \right\} \times 100\% \quad (3)$$

第 k 节点的分布式电源的有功出力增加 $\Delta P_{k,G}$ 后, 对节点 k 电压的改变 $\Delta u_{k,G}$ 为

$$\Delta u_{k,G} = \sum_{i=0}^k R_i P_{k,G} \quad (4)$$

可见, 分布式电源的出力变化可以引起并网点的电压偏差发生变化, 从而影响并网点的电压。故当并网点电压发生变化时, 可通过控制分布式电源的有功、无功出力来调节。

1.2 分布式电源的有功无功独立控制

大多数经电压源型逆变器并网的分布式电源, 采用双环控制, 通过电压环和电流环实现直流电压和并网电流的控制。逆变器输出的有功功率可通过调节 d 轴电流来控制出力大小, 无功功率可通过调节 q 轴电流来控制出力情况。

如图 2 所示为三相静止坐标系与两相旋转坐标系 d - q 之间的关系, θ 为 q 轴与电网 a 相之间的夹角。

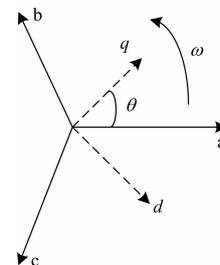


图 2 d - q 与 a - b - c 位置关系

Fig. 2 Relationship between d - q and a - b - c

三相到两相的 Park 变换为

$$T_{abc/dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

由文献[12]可知逆变器的输出电压方程式如式(6)所示。

$$u_d = L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + e_d \quad (6)$$

$$u_q = L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + e_q$$

有功及无功表达式如式(7)所示。

$$P = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) \quad (7)$$

$$Q = \frac{3}{2} (e_q i_d - e_d i_q)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 为逆变器并网侧电压、电流分别在 dq 轴上的分量, e_d 、 e_q 为电网电压在 dq 轴上分量。电网电压在三相静止坐标系中可以表示为式(8)。

$$\begin{aligned} e_a &= U_m \sin(\omega t) \\ e_b &= U_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c &= U_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: U_m 为电压峰值; ω 为角频率。

式(8)通过派克变换可得

$$\begin{aligned} e_d &= U_m \\ e_q &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

则将式(7)代入式(5)可得:

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} e_d i_d \\ Q &= -\frac{3}{2} e_d i_q \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可得, 逆变器输出的有功、无功功率与 dq 轴电流有关。其有功功率可通过调节 d 轴电流来控制出力大小, 无功功率可通过调节 q 轴电流来控制出力情况。

由文献[13]可知采用同步电流 PI 控制可实现 i_d 、 i_q 解耦, 能够独立控制有功、无功电流, 因此可实现有功、无功出力的独立控制。

2 DG 并网的控制策略研究

因为分布式电源的出力对并网点电压变化有影响, 所以当并网点电压越上限或越下限时, 可以采

取本地控制仅对此接入点的分布式电源的有功、无功出力进行控制。分布式电源经逆变器接入配电网, 不仅向电网提供有功功率, 也可以向电网提供无功功率。经过解耦, 就可以通过分别控制 dq 轴上电流来控制其有功无功的出力大小。

实际应用中, 本文描述的本地控制策略可以固定的时间间隔不断进行, 以跟踪自然资源(影响分布式电源的最大有功功率输出)和负荷的变化。

2.1 只调节分布式电源的有功出力

当分布式电源以单位功率因数方式运行时, 其只发出有功功率。根据监测到的 PCC 点电压, 可对 DG 的有功出力进行相应的本地控制。分布式电源的本地控制以固定的间隔进行, 如图 3 流程图所示。

对于某一轮控制:

1) 若监测到 PCC 点电压 U 大于电压上限 U_{\max} (即 $1.07U_N$, U_N 为额定电压), 若分布式电源的有功出力 P 不为 0, 则将 P 的值减小一半。

2) 若 $U < U_{\max} - \varepsilon$ (ε 为一个小值, 实际中 $U_{\max} - \varepsilon$ 可取 $1.05U_N$), 且 $P < P_{\max}$ (P_{\max} 为分布式电源的出力最大值)时, 对此节点 DG 的有功出力按式(11)增加:

$$P^{<k+1>} = \frac{1}{2} (P^{<k>} + P_{\max}) \quad (11)$$

在本文中, 上标 $<k>$ 和 $<k+1>$ 分别表示第 k 和 $k+1$ 轮调节。

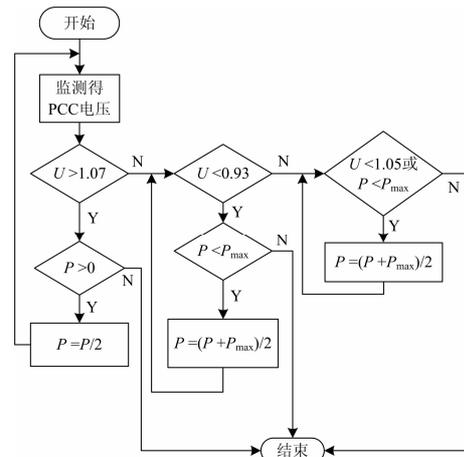


图 3 分布式电源的单纯有功出力本地控制流程图

Fig. 3 Flow chart of active power local control for DG

2.2 分布式电源的有功、无功出力协调控制

当分布式电源既可发有功功率又可以发无功功率时, 根据监测到 PCC 点电压, 分别对其有功出力和无功出力进行本地控制, 该本地控制也是以固定的间隔进行, 如图 4 流程图所示。

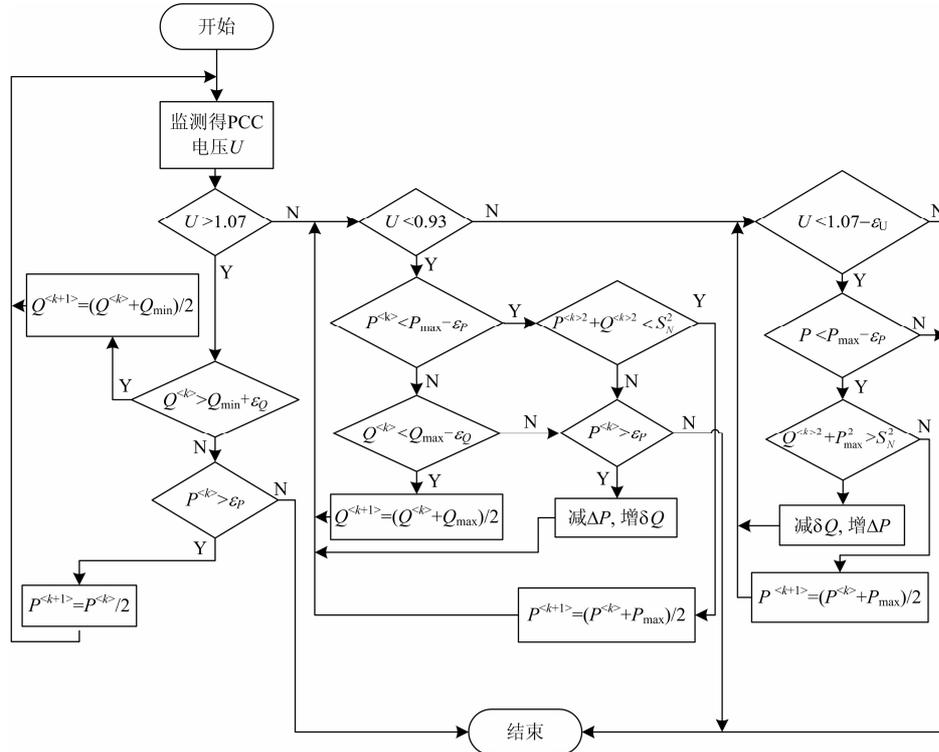


图 4 分布式电源同时考虑有功无功出力时本地控制流程图

Fig. 4 Flow chart of active and reactive power local control for DG

对于某一轮控制:

1) 若 $U > U_{\max}$

(1) 判断是否满足 $U > U_{\max}$, 若是则转(2)。

(2) 根据式(12)计算当前 DG 无功出力范围

$$-\sqrt{S_N^2 - P^{<k>^2}} \leq Q \leq \sqrt{S_N^2 - P^{<k>^2}} \quad (12)$$

即 $Q_{\min} = -\sqrt{S_N^2 - P^{<k>^2}}$, $Q_{\max} = \sqrt{S_N^2 - P^{<k>^2}}$, S_N

为 DG 的额定容量。

若 $Q^{<k>} > Q_{\min} + \varepsilon_Q$ (ε_Q 一般可选取为 $0.05 Q_{\max}$), 则转(3), 否则转(4)。

(3) 令 DG 第 k+1 轮无功出力为

$$Q^{<k+1>} = \frac{1}{2}(Q^{<k>} + Q_{\min}) \quad (13)$$

并返回(1)。

(4) 判断是否满足 $P^{<k>} > \varepsilon_P$ (ε_P 一般可选取为 $0.05 P_{\max}$), 若是则令 DG 第 k+1 轮有功功率为

$$P^{<k+1>} = \frac{1}{2} P^{<k>} \quad (14)$$

并返回(1), 否则直接退出。

2) 若 $U < U_{\min}$

(1) 判断是否满足 $U < U_{\min}$, 若是则转(2)。

(2) 判断是否满足 $P^{<k>} < P_{\max} - \varepsilon_P$, 若是, 则转

(3); 否则, 转(4)。

(3) 判断是否满足 $P^{<k>} + Q^{<k+2>} < S_N^2$, 若是, 则按式(11)增加 DG 的有功功率并返回(1); 否则, 转(5)。

(4) 根据式(12)计算 Q_{\max} 、 Q_{\min} , 判断是否满足 $Q^{<k>} < Q_{\max} - \varepsilon_Q$, 若满足, 则令 DG 第 k+1 轮无功功率为

$$Q^{<k+1>} = \frac{1}{2}(Q^{<k>} + Q_{\max}) \quad (15)$$

并返回(1); 否则转(5)。

(5) 判断是否满足 $P^{<k>} > \varepsilon_P$, 若满足则令:

$$P^{<k+1>} = P^{<k>} - \Delta P \quad (16)$$

同时计算:

$$Q^{<k+1>} = \sqrt{S_N^2 - P^{<k+1>^2}} \quad (17)$$

执行一轮调节, 并返回(1); 若不满足, 则直接退出。

3) 若 $U_{\min} < U < U_{\max}$ 且 $P < P_{\max}$

(1) 先判断是否满足 $U < U_{\max} - \varepsilon_U$ (ε_U 一般可取为 $0.02 U_N$), 若满足则转(2)。

(2) 判断是否满足 $P^{<k>} < P_{\max} - \varepsilon_P$, 若是则转(3), 否则直接退出。

(3) 判断是否满足 $P_{\max}^2 + Q^{<k>^2} > S_N^2$, 若满足, 则转(4), 若不满足, 则转(5)。

(4) 令:

$$Q^{<k+1>} = Q^{<k>} - \delta Q \quad (18)$$

δQ 一般可取为 Q_{\max} 的 5%, 同时计算,

$$P^{<k+1>} = \sqrt{S^2 - Q^{<k+1>^2}} \quad (19)$$

执行一轮调节, 并返回(1)。

(5) 按式(11)增加 DG 的有功功率执行一轮调节, 并返回(1)。

3 算例

本节以 IEEE33 节点配电网为例说明本文所提出的本地控制策略的有效性。例中, 额定电压为 12.66 kV, 负荷的总有功功率为 3.7150 MW, 总无功功率为 2.30 Mvar。

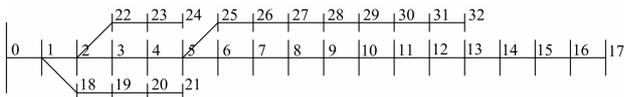


图 5 IEEE33 节点接线图
Fig. 5 IEEE33 node system

场景 1: 在某次控制时, 各个 DG 正按照单位功率因数并以最大功率跟踪方式输出, 其额定容量和实际出力情况如表 1 所示, 此时各个节点的电压分布情况如表 2 中第 2 列所示, 可见节点 11~17 的电压均越上限。由于电压越限的节点中 13, 15, 16 节点接有 DG, 所以按照本文所提出的方法对相应的 DG 的有功出力和无功出力进行本地控制, 执行 2 轮本地控制后, 各节点的电压都达到正常范围, 此时各个节点电压和各 DG 的出力分别如表 2 中第 3 列~第 5 列所示。

表 1 场景 1 中 DG 接入的位置及容量

Table 1 Condition and capacity for DG access in scene 1

节点	最大有功功率 输出能力/kW	当前无功 出力/kvar	额定容 量/MVA
6	700	0	0.80
7	700	0	0.80
10	700	0	0.80
13	700	0	0.80
15	700	0	0.80
16	700	0	0.80
21	700	0	0.80
24	700	0	0.80
27	700	0	0.80
29	700	0	0.80
30	700	0	0.80

表 2 经 2 轮本地控制后各节点电压及 DG 的实际出力
Table 2 Each node voltage and the actual output of DG
after 2 rounds of local control

节点	控制前各节点	控制后各节点	控制后 DG 实际出力	
	电压/p.u.	电压/p.u.	P/kW	Q/kvar
0	1.000	1.000	-	-
1	1.001	1.001	-	-
2	1.008	1.006	-	-
3	1.014	1.011	-	-
4	1.021	1.017	-	-
5	1.034	1.026	-	-
6	1.035	1.024	700	0
7	1.045	1.033	700	0
8	1.056	1.040	-	-
9	1.067	1.048	-	-
10	1.069	1.050	700	0
11	1.073	1.053	-	-
12	1.085	1.060	-	-
13	1.090	1.061	700	-193.65
14	1.093	1.063	-	-
15	1.098	1.066	700	-290.47
16	1.102	1.066	700	-290.47
17	1.101	1.066	-	-
18	1.001	1.001	-	-
19	1.004	1.004	-	-
20	1.005	1.005	-	-
21	1.008	1.007	700	0
22	1.006	1.004	-	-
23	1.004	1.002	-	-
24	1.004	1.003	700	0
25	1.035	1.027	-	-
26	1.036	1.028	-	-
27	1.039	1.031	700	0
28	1.038	1.030	-	-
29	1.040	1.032	700	0
30	1.040	1.033	700	0
31	1.039	1.031	-	-
32	1.039	1.031	-	-

场景 2: 在随后的某次控制时, 负荷节点 16 的有功功率和无功功率分别增加为 200 kW 和 20kvar; 负荷节点 17 的有功功率和无功功率分别增加为 900 kW 和 400 kvar。因自然因素好转, 各 DG 的最大有功功率输出能力也有所增加, 如表 3 第 2 列所示, 此时各节点的电压分布情况如表 4 中第 2 列所示。

经过 5 轮本地控制运算后各 DG 的有功功率出力都达到最大有功功率输出能力且各节点电压也都在正常范围, 此时各个节点电压和各 DG 的出力分别如表 4 中第 3 列~第 5 列所示。

表 3 场景 2 中各 DG 的最大有功功率输出能力
Table 3 Maximum active power capacity of DGs in scene 2

节点	最大有功功率 输出能力/kW	当前的有功 功率出力/kW	当前无功 出力/kvar
6	750	700	0
7	750	700	0
10	750	700	0
13	750	700	-193.65
15	750	700	-290.47
16	750	700	-290.47
21	750	700	0
24	750	700	0
27	750	700	0
29	750	700	0
30	750	700	0

表 4 经 5 轮本地控制后各节点电压及 DG 的实际出力
Table 4 Each node voltage and the actual output of DG
after 5 rounds of local control

节点	控制前各节 点电压/p.u.	控制后各节 点电压/p.u.	控制后DG实际出力	
			P/kW	Q/kvar
0	1.000	1.000	-	-
1	1.000	1.001	-	-
2	1.002	1.004	-	-
3	1.005	1.008	-	-
4	1.009	1.013	-	-
5	1.012	1.018	-	-
6	1.008	1.014	750	-
7	1.012	1.020	750	-
8	1.012	1.021	-	-
9	1.013	1.023	-	-
10	1.014	1.024	750	-
11	1.014	1.025	-	-
12	1.011	1.023	-	-
13	1.007	1.020	750	-193.65
14	1.004	1.018	-	-
15	1.002	1.016	750	-275.95
16	0.991	1.006	750	-275.95
17	0.985	1.000	-	-
18	1.001	1.001	-	-
19	1.003	1.004	-	-
20	1.005	1.006	-	-
21	1.007	1.008	750	-
22	1.001	1.003	-	-
23	0.998	1.000	-	-
24	0.999	1.001	750	-
25	1.013	1.019	-	-
26	1.014	1.020	-	-
27	1.018	1.025	750	-
28	1.017	1.024	-	-
29	1.018	1.026	750	-
30	1.018	1.027	750	-
31	1.018	1.026	-	-
32	1.017	1.025	-	-

由表 3 第 2 列可以看出, 各 DG 的最大有功功率输出能力有所增加, 所以按照本文所提出的方法对相应的 DG 的有功出力、无功出力进行本地控制, 执行 5 轮本地控制后, 由表 4 第 2、3 列可以看出, 各节点电压都有所提高且在正常范围内, 由表 4 第 4 列可以看出各 DG 的有功功率出力达到最大有功功率输出能力。

4 结论

本文在基于本地控制的基础上, 综合考虑了分布式电源的有功、无功出力对配电网的影响, 并提出合理的控制策略。当分布式电源的并网点电压越上限或越下限时, 利用二分法来控制分布式电源的有功、无功出力, 以此改善并网点的电压。并且通过算例验证了文章所提的控制策略是有效合理的。

参考文献

- [1] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电对配电网影响的综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 132-135.
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. The integrated evaluation of impact of distributed generation on distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 132-135.
- [2] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.
XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [3] 刘健, 同向前, 潘忠美, 等. 考虑过电压因素时分布式光伏电源的准入容量[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 45-51.
LIU Jian, TONG Xiangqian, PAN Zhongmei, et al. The maximum power of distributed PV generation according to over-voltage in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 45-51.
- [4] 陈芳, 王玮, 徐丽杰, 等. 分布式电源接入对配电网电压变化的分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 145-149.
CHEN Fang, WANG Wei, XU Lijie, et al. Analyzing the voltage variation of distribution network including distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(4): 145-149.
- [5] 李题印, 韩永强, 胡晓琴, 等. 分布式发电接入电网的

- 静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13.
- LI Tiyin, HAN Yongqiang, HU Xiaoqin, et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.
- [6] 黄欣科, 王环, 王一波, 等. 光伏发电系统并网点电压升高调整原理及策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 112-117.
- HUANG Xinke, WANG Huan, WANG Yibo, et al. Principle and strategies of voltage rise regulation for grid-connected photovoltaic generation system at point of common coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 112-117.
- [7] CONTI S, RAITI S, TINA G, et al. Study of the impact of PV generation on voltage profile in LV distribution networks[C] // 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings, 2001.
- [8] 李闯, 陈民铀, 付昂, 等. 含风电场的配电网无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 100-105.
- LI Chuang, CHEN Minyou, FU Ang, et al. Reactive power optimization strategy in distribution network with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 100-105.
- [9] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 107-112.
- HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality composite control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 107-112.
- [10] 周林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.
- ZHOU Lin, ZENG Yi, GUO Ke, et al. Development of photovoltaic grid-connected system with power quality regulatory function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 137-145.
- [11] 黄欣科, 王环, 王一波, 等. 光伏发电系统并网运行PCC电压跌落补偿研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(12): 54-56.
- HUANG Xinke, WANG Huan, WANG Yibo, et al. Voltage sag compensation in grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power Electronics, 2013, 47(12): 54-56.
- [12] ZENG Q, CHANG L, SONG P. SVPWM-based current controller with grid harmonic compensation for three-phase grid-connected VSI[C] // PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. 2004: 2494-2500.
- [13] 时智勇, 贺明智, 郝瑞祥, 等. 基于同步PI控制的光伏并网发电系统研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 39-41.
- SHI Zhiyong, HE Mingzhi, HAO Ruixiang, et al. Research of systems based on synchronous PI control[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 39-41.

收稿日期: 2015-09-27; 修回日期: 2015-11-19

作者简介:

刘健(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 百万人才工程国家级人选, 国家电网公司科技领军人才, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: Powersys@263.net

尹海霞(1990-), 女, 硕士研究生, 配电网及其自动化技术。E-mail: yinhaixia0902@163.com

(编辑 张爱琴)