

分散式风电 AVC 策略

刘其辉,赵亚男,毛 未

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:传统的自动电压控制(AVC)策略主要针对风电场,且其关注点仅仅为并网节点或远端单节点电压情况,并不适用于分散式风电,为此提出了改进 AVC 策略。改进的 AVC 策略选取配电网电压偏差最严重的节点作为控制节点进行无功整定得到无功指令值。结合分散式风电多点接入的特点并综合考虑多种分配算法,将无功分配算法分为 3 个层面:不同节点之间按灵敏度大小进行无功指令值分配;同一节点不同机组之间按机组无功容量分配无功指令值;双馈机组内部定子侧优先分配无功指令值。通过算例仿真验证了改进 AVC 策略的有效性与可靠性。与传统的 AVC 策略相比,改进 AVC 策略能够根据分散式风电接入配电网方式较为灵活的特点,充分利用多台风电机组的无功输出能力,有效地改善配电网电压水平。

关键词:分散式风电;无功电压;自动电压控制;配电网

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.027

0 引言

目前,开发利用风电最主要的形式是大规模风电场,但它们都位于电网末端,远离负荷中心。电网消纳能力的不足以及传输容量的限制带来了大范围的“弃风”现象,严重降低了风力发电的经济效益^[1]。相对于集中式发电,分散式风力发电规模小,直接接入配电网进行就地消纳,不需要远距离输电。然而,由于配电网网架结构相对薄弱,风电接入方式灵活多样,分散式风电会给电网的稳定运行、电能质量等方面带来影响。因此,研究分散式风电接入关键技术具有非常重要的意义。

分散式风电机组接入配电网,在无功优化控制方面,当前研究主要集中在含分散式电源的配电网无功优化、基于无功补偿设备的调压技术、风电场分层自动电压控制(AVC)系统 3 个方面。其中无功优化通过建立目标函数以及约束条件,采用优化算法得出最佳无功配置^[2-3],但是此优化算法仅适用于长时间尺度的全局优化,对于短时间内电网电压快速控制并不适用。考虑到系统中的无功补偿设备,文献[4-5]研究了将无功补偿器应用于电力系统来改善风电接入点电压稳定性的问题,其注重于无功补偿设备的研究,忽视了风电机组本身的无功支撑能力,增加了投资与运行成本。风电场 AVC 系统分为无功整定层和无功分配层,整定层根据电压控制需求得到电网需要的无功指令值,分配层将无功指令值下发到各无功电源^[6-9],目前该方面研究主要针对集中并网模式的风电场,且其关注点仅仅为风电场并网节点或远端单节点电压情况,并没有充分考虑分散式风电接入方式较为

灵活的特点^[10-12]。另外针对分散式风电接入微电网中的无功控制策略已有学者进行了研究,文献[1]考虑风功率预测无功功率信息,按照优先级筛选风电机组,调节功率输出以跟踪无功功率指令。

为解决上述问题,本文提出了一种适用于分散式风电的 AVC 策略。该策略在传统 AVC 系统的基础上进行改进,将配电网所有节点的情况考虑在内,选择电压偏差最严重的节点作为控制节点,计算得到无功指令值^[13];另外,考虑到分散式风电接入位置、每个节点接入的机组数量以及机组类型较为灵活的特点,在无功分配方面综合考虑多种现有的无功分配算法,提出了 3 个层面的分配:不同节点之间的风电机组(群)按灵敏度算法分配无功指令值;同一节点的风电机组(群)按无功容量分配无功指令值;风电机组内部按定子侧优先进行分配。上述策略充分考虑了分散式风电的特点,协调各风电机组发挥无功调节能力,并且避免了电压调节的盲目性,增强了配电网对电压波动的抵御性。

1 考虑风电接入的配电网电压分布特性

图 1 为接入分散式风电机组的典型辐射形配电网,线路上有 N 个节点,每个节点的负荷为 $P_{Li}+jQ_{Li}$ ($i=1,2,\dots,N$),线路初始端电压为 U_0 ,节点 i 电压为 U_i ,节点 i 与节点 $i-1$ 之间的线路阻抗为 R_i+jX_i 。

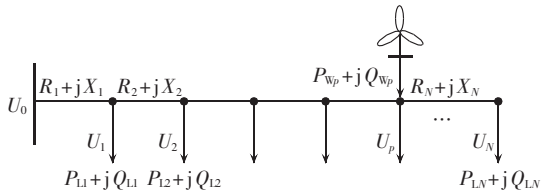


图 1 典型辐射形配电网

Fig.1 Typical radial distribution network

设有功、无功功率由电源向负载方向流动为正值,

收稿日期:2017-04-14;修回日期:2017-06-20

基金项目:国家电网公司科技项目(SGSDDK00KJJS1500155)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGSDDK00KJJS1500155)

忽略线路损耗,则节点 i 与 $i-1$ 之间电压损失为^[14]:

$$\Delta U_i = U_{i-1} - U_i = \frac{R_i \sum_{n=i}^N P_{Ln} + X_i \sum_{n=i}^N Q_{Ln}}{U_i} \quad (1)$$

假设不考虑无功补偿设备,因负荷的有功功率和无功功率均大于 0,故式(1)中电压损失恒为正值,即线路电压随着与初始点距离的增大而降低。根据式(1)可得节点 i 的电压为:

$$U_i = U_0 - \sum_{n=1}^i \Delta U_n = U_0 - \sum_{n=1}^i \frac{R_n \sum_{j=n}^N P_{Lj} + X_n \sum_{j=n}^N Q_{Lj}}{U_n} \quad (2)$$

首先考虑单节点接入风电的情况,假设在图 1 所示配电网的节点 p 接入分散式风电机组,机组出力为 $P_{wp} + jQ_{wp}$,此时可得节点 i 的电压为:

$$U_i = \begin{cases} U_0 - \sum_{n=1}^i \frac{R_n \left(\sum_{j=n}^N P_{Lj} - P_{wp} \right) + X_n \left(\sum_{j=n}^N Q_{Lj} - Q_{wp} \right)}{U_n} & 0 < i \leq p \\ U_p - \sum_{n=p+1}^i \frac{R_n \sum_{j=n}^N P_{Lj} + X_n \sum_{j=n}^N Q_{Lj}}{U_n} & p < i \leq N \end{cases} \quad (3)$$

进一步考虑配电网多个节点接入风电机组的情况,假设节点 j ($j=1, 2, \dots, N$) 处风电机组出力为 $P_{wj} + jQ_{wj}$ (若节点 j 没有接入风电机组,则 $P_{wj}=0, Q_{wj}=0$),此时节点 i 电压为:

$$U_i = U_0 - \sum_{n=1}^i \frac{R_n \sum_{j=n}^N (P_{Lj} - P_{wj}) + X_n \sum_{j=n}^N (Q_{Lj} - Q_{wj})}{U_n} \quad (4)$$

由式(4)可知,分散式风电机组有功出力变化、配电网负荷波动都会使配电网潮流、电压频繁发生变化,而通过调节风电机组无功出力可以抑制电压偏差或电压波动。

2 风电机组无功功率极限分析

由上述分析可知,通过控制分散式风电机组的无功功率可以达到控制电网电压的目标,风电机组输出无功功率受其无功功率极限的限制。

当前风电机组的主流机型为直驱机组和双馈机组,其中直驱机组网侧变流器可以向电网输送有功、无功功率,双馈机组网侧变流器及双馈感应发电机(DFIG)定子侧均能向电网输送有功、无功功率,如图 2 所示。图中, P_s, Q_s 分别为机组定子侧输出的有功、无功功率; P_g, Q_g 分别为整个发电系统向电网输送的有功、无功功率; P_r, Q_r 分别为双馈机组转子侧输出的有功、无功功率; P_c, Q_c 分别为网侧变流器输出的有功、无功功率。

2.1 网侧变流器的无功功率极限

如图 2 所示,风电机组网侧变流器与电网直接

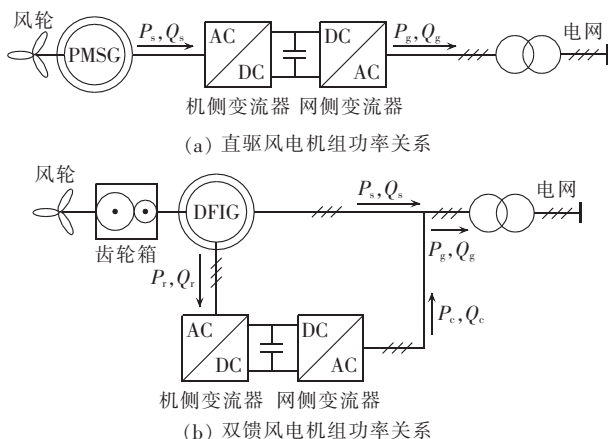


图 2 风电机组功率关系

Fig.2 Power relationships of wind-power units

相连。当风电机组运行在低风速时,网侧变流器工作在轻载状态,并没有充分发挥其功率处理能力,因此当系统对无功功率有要求时,可考虑让其输出一定的无功功率。

设网侧变流器的额定容量为 S_c ,考虑容量限制得到其无功功率范围如下:

$$-\sqrt{S_c^2 - P_c^2} \leq Q_c \leq \sqrt{S_c^2 - P_c^2} \quad (5)$$

忽略变流器有功损耗,则对于直驱机组有 $P_c = P_s$,对于双馈机组有 $P_c = sP_s$,其中 s 为 DFIG 转差率。由此得到直驱机组、双馈机组网侧变流器的无功功率极限分别如式(6)、式(7)所示。

$$Q_{c\max} = \sqrt{S_c^2 - P_s^2}, \quad Q_{c\min} = -\sqrt{S_c^2 - P_s^2} \quad (6)$$

$$Q_{c\max} = \sqrt{S_c^2 - (sP_s)^2}, \quad Q_{c\min} = -\sqrt{S_c^2 - (sP_s)^2} \quad (7)$$

其中, $Q_{c\max}, Q_{c\min}$ 分别为网侧变流器无功功率最大值、最小值。

2.2 定子侧无功功率极限

对于双馈机组而言,除了网侧变流器可以输出无功功率,发电机定子侧也可以向电网输送无功功率,其功率运行范围受定子绕组、转子绕组和机侧变流器的电流限制影响,但起主要作用的为机侧变流器的电流限制,由此得到定子无功功率的范围如下^[15]:

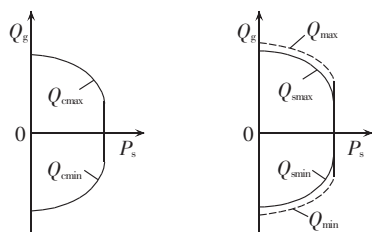
$$\begin{cases} Q_{s\max} = -\frac{3U_g^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3X_m U_g}{2X_s} I_{\max}\right)^2 - P_s^2} \\ Q_{s\min} = -\frac{3U_g^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m U_g}{2X_s} I_{\max}\right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $Q_{s\max}, Q_{s\min}$ 分别为 DFIG 定子无功功率的最大值、最小值; U_g 为电网电压矢量幅值; X_m 为激磁电抗; X_s 为定子电抗; $I_{\max}$ 为机侧变流器的电流限值。

综上所述,DFIG 向电网发出的无功功率极限为:

$$Q_{\max} = Q_{s\max} + Q_{c\max}, \quad Q_{\min} = Q_{s\min} + Q_{c\min} \quad (9)$$

图 3 为直驱机组与双馈机组无功输出范围,由图可知风电机组无功调节能力会随有功出力增加而降低,而且双馈机组的无功输出包括定子侧输出无功与网侧变流器输出无功两部分。



(a) 直驱机组无功范围 (b) 双馈机组无功范围

图 3 风电机组无功功率范围

Fig.3 Reactive-power limits of wind-power units

3 改进的 AVC 策略

3.1 AVC 系统结构

传统 AVC 系统一般分为 2 层:无功整定层和无功分配层^[7]。整定层通过检测电网实时数据并根据电压控制算法计算得到无功指令值;分配层将该指令值按一定原则分配到每台风电机组。另外,传统 AVC 策略仅仅是关注风电场并网点或远端并网点的电压情况,控制对象是多台风电机组,机组之间的无功指令一般按无功容量算法或等功率因数法进行分配,对不同节点接入的风电机组之间的分配涉及较少。分散式风电机组的接入点和接入容量都比较灵活,且配电网网架结构相对薄弱,其无功电压控制应充分考虑配电网各个节点的电压情况,并且最大化利用分散式风电机组的无功输出对配电网的支撑能力。为此,对传统 AVC 策略作出 2 点改进:一是在控制目标方面,改变传统上对固定节点进行电压控制的模式,检测或计算配电网各个节点电压 U_i ,以电压越限最严重的节点 k 作为控制节点进行无功整定;二是在无功功率分配方面,将无功功率分配分为不同节点之间的无功分配、接于同一节点的不同风电机组之间的无功分配、(双馈)风电机组内部(定子、网侧变流器)的无功分配 3 个层次,考虑到不同节点无功输出对配电网电压的不同影响以及风电机组无功输出范围,在 3 个层次上分别采用不同的无功分配方法。与传统 AVC 策略相比,改进的 AVC 策略不再局限于单一并网点的电压控制,扩大了电压控制范围,增强了控制效果,其控制对象为多台风电机组,考虑了不同节点接入的风电机组之间的分配。改进的 AVC 策略整体结构分为控制节点选择、无功整定、无功指令分配和风电机组控制策略 4 层,如图 4 所示。

3.2 控制节点选择层

由于分散式风电接入方式灵活,风电功率的变化和负荷功率的变化使得配电网电压变化更加复杂,传统的针对固定节点的电压控制模式不再适用,本文采用了实时确定电压薄弱节点并对其进行电压控制的思路。考虑配电网的实际情况,由于量测装置的匮乏,网络所有节点的电压无法全部通过测量直接得到。针对辐射形配电网,在控制精度要求不高的情

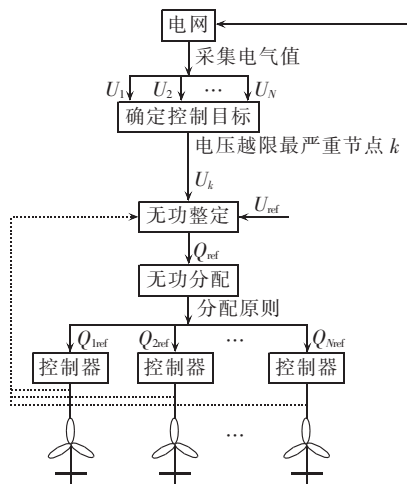


图 4 AVC 策略整体方案

Fig.4 Overall scheme of AVC strategy

况下,可在已有量测数据以及电网数据的基础上根据式(4)计算得到其余节点的电压,然后选择电压偏差最严重的节点作为控制节点,控制目标选择流程如图 5 所示。

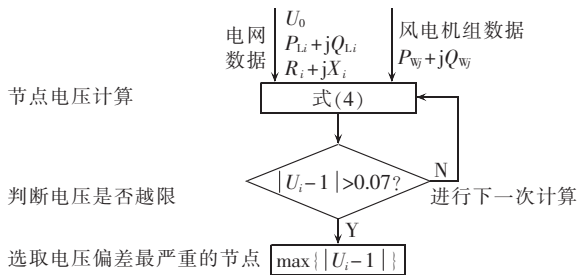


图 5 控制目标选择流程图

Fig.5 Flowchart of control target selection

3.3 无功整定层

无功整定层是确定无功指令值的环节,其控制原理如图 6 所示。该环节通过比较控制节点的实际电压与参考电压,得到电压偏差量,经过死区控制输入 PI 控制器,最后在满足无功功率极限限制的情况下得到无功指令值。其中,死区的设置根据国家标准,低压配电网节点电压偏差不得超过额定电压的 $-7\% \sim 7\%$ ^[16]。

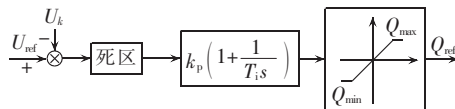


图 6 无功整定控制框图

Fig.6 Block diagram of reactive-power setting control

3.4 无功指令分配层

整定层得到的无功指令值由分配层分配给各台风电机组。值得注意的是,现有的大部分文献均是针对电网单节点接入机组,采用等功率因数分配^[8]和按机组无功容量比例分配^[9]等方法将无功指令值分配到各台机组。当分散式风电机组多节点接入配电

网时且每个节点接入风电机组数量不同时,配电网潮流方向和大小变化更加复杂,若依旧按照上述原则进行分配会使得电压调整具有盲目性,无法实现无功最优化分配,不但增大网络损耗,而且电压控制效果差,造成无功浪费。因此,本文提出的 3 个层次的无功指令分配方案如图 7 所示。其中, $Q_{j\text{ref}}$ 为节点 j 的无功指令; $Q_{jq\text{ref}}$ 为节点 j 上第 q 台机组的无功指令。

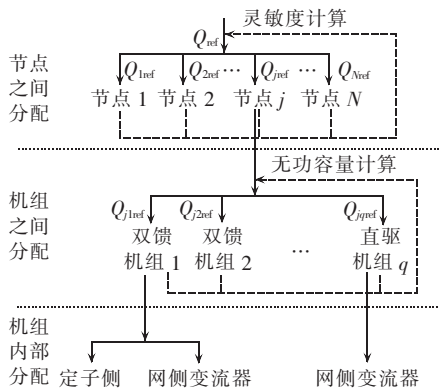


图 7 无功指令分配层整体方案

Fig.7 Overall scheme of reactive-power distribution layers

a. 不同节点之间的分配原则。

文献[17]提出采用潮流灵敏度法计算各无功补偿设备的无功指令值,本文将此方法应用到接有分散式风电机组的不同节点之间的无功分配中。

设配电网节点 $j(j=1,2,\dots,N)$ 接入的风电机组输出的无功功率为 Q_{wj} ,记节点电压 $U_i(i=1,2,\dots,N)$ 对 Q_{wj} 的灵敏度为 K_{ij} ,即:

$$K_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial Q_{wj}} \quad (10)$$

灵敏度 K_{ij} 的物理意义是指节点 j (风电) 无功输出 Q_{wj} 对节点 i 电压 U_i 的影响敏感程度,灵敏度越大,代表两者之间的耦合度越高,即相对其他节点,节点 j (风电) 无功对节点 i 电压的影响效果更加明显。

其中,辐射形配电网中节点 k 的电压 U_k 为:

$$U_k = U_0 - \sum_{n=1}^k \frac{R_n \sum_{j=n}^N (P_{Lj} - P_{wj}) + X_n \sum_{j=n}^N (Q_{Lj} - Q_{wj})}{U_n} \quad (11)$$

根据式(10)、(11),得到节点 k 电压对于节点 j 输出无功的灵敏度为:

$$K_{kj} = \frac{\partial U_k}{\partial Q_{wj}} = \begin{cases} \sum_{n=1}^j \frac{X_n}{U_n} & k \geq j \\ \sum_{n=1}^k \frac{X_n}{U_n} & k < j \end{cases} \quad (12)$$

考虑到各个节点的电压变化对灵敏度的影响很小,当电压取标么值时,对式(12)进行简化得:

$$K_{kj} = \begin{cases} \sum_{n=1}^j X_n & k \geq j \\ \sum_{n=1}^k X_n & k < j \end{cases} \quad (13)$$

由灵敏度的概念可知,对某节点电压进行调整时,应该优先采用对该点灵敏度高的节点风电无功调节能力,这样无功分配最为有效。由此可得接入节点 j 的风电机组总的无功指令值为:

$$Q_{j\text{ref}} = \frac{K_{kj}}{\sum_{n=1}^N K_{kn}} Q_{\text{ref}} \quad (14)$$

b. 同一节点不同风电机组之间的分配原则。

同一节点接入的机组无功指令分配方法有等功率因数分配和按机组无功容量比例分配,若采用等功率因数分配,有功出力较大的机组会出现功率越限的情况,因此本文对同一个节点接入的风电机组按无功容量比例进行分配。

按机组无功容量比例原则,分配给接于节点 j 的第 q 台风电机组的无功功率指令值为:

$$Q_{jq\text{ref}} = (Q_{q\text{max}}/Q_{\text{totalmax}}) Q_{j\text{ref}} \quad (15)$$

其中, $Q_{jq\text{ref}}$ 为节点 j 上第 q 台风电机组的无功功率指令值; $Q_{q\text{max}}$ 为第 q 台风电机组的无功功率极限; Q_{totalmax} 为节点 j 连接的所有参与无功调节的机组无功极限之和; $Q_{j\text{ref}}$ 节点 j 上风电机组总的无功指令值。

c. 风电机组内部的分配原则。

对于直驱风电机组,只有网侧变流器向电网输送无功,因此不存在机组内部分配的问题;对于双馈风电机组,无功指令可以在定子侧、网侧变流器之间进一步分配。其中,双馈机组定子无功功率输出实际是通过控制转子侧功率来实现的,而转子侧仅需控制转差功率即可,所以从尽量减小控制系统需要处理的功率出发,在分配无功功率时优先考虑定子侧^[18],即当机组无功指令值处于定子侧无功极限范围内时,只由定子侧向电网发送无功,当机组无功指令值超过定子侧无功极限时,超出的部分由网侧变流器产生。

3.5 单机控制层

风电机组收到本机组无功指令后通过变流控制发出无功功率,控制策略如图 8 所示,其中直驱机组只需控制网侧变流器发出需要的无功功率,双馈机组需要根据定子侧与网侧变流器的无功指令分配情况分别控制机侧、网侧变流器,具体的控制策略可参考文献[19],在此不再赘述。图中, Q_{jq} 为节点 j 上第 q 台风电机组的无功功率输出实际值; k_{p1} 、 T_{i1} 分别为功率外环 PI 控制器的比例系数和积分系数; k_{p2} 、 T_{i2} 分别为电流内环 PI 控制器的比例系数和积分系数; u_{rd}^* 为电压指令值; Δu_{rd} 为电压补偿项。

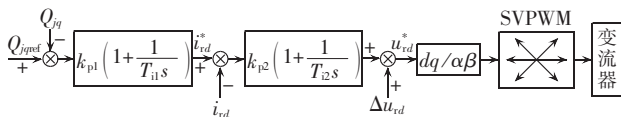


图 8 风电机组无功控制框图

Fig.8 Block diagram of reactive-power control for wind-power unit

值得注意的是,上述 4 层控制策略只能应用在风电机组通信良好的情况下,当通信中断或者通信不良时,风电机组根据本地接入点电压的情况直接通过如图 6 所示的无功整定得到无功功率指令值,进而通过变流控制输出无功功率。

4 仿真验证

为验证上述控制策略的有效性,在 PSCAD 仿真环境中建立如图 9 所示的 7 节点辐射形配电网模型,配电网额定电压为 10 kV,节点之间的阻抗均为 $1.12+j1.32\ \Omega$,节点负荷参数见表 1,配电网节点 3、节点 4、节点 6 各接入 1 台、1 台、2 台双馈风电机组,机组编号如图 9 所示,其中双馈风电机组参数见表 2。

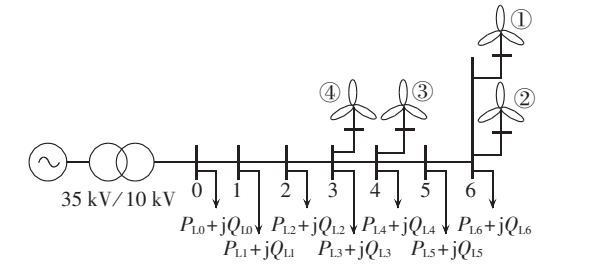


图 9 配电网拓扑图
Fig.9 Topology of distribution network

表 1 配电网节点负荷参数

Table 1 Nodal loads of distribution network					
节点	有功 负荷/MW	无功 负荷/Mvar	节点	有功 负荷/MW	无功 负荷/Mvar
0	25	5	4	0.45	0.09
1	0.45	0.09	5	0.45	0.09
2	0.45	0.09	6	0.45	0.09
3	0.45	0.09			

表 2 双馈机组参数
Table 2 Parameters of DFIG

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	1.5	转子漏感/H	0.0003982
额定电压/V	690	进线电阻/ Ω	0.0003
互感/H	0.00973	进线电抗/H	0.0008
定子电阻/ Ω	0.00579	风轮半径/m	38.5
定子漏感/H	0.0002645	齿轮箱变比	104
转子电阻/ Ω	0.00621	电容/ μF	8640

为验证上述控制策略的有效性,分别针对风电机组出力变化和配电网负荷变化 2 种工况进行算例分析与验证。

4.1 工况 1:风电机组出力变化

设③、④号风电机组运行风速为 10 m/s,①、②号风电机组运行风速在 5 s 时由 9 m/s 阶跃到 11 m/s。风速变化使得①、②号风电机组有功出力增加,进而导致节点 6、5 电压超越上限值 1.07 p.u.,如图 10(a)所示。图 10(b)为采用仅考虑并网点电压的传统 AVC 策略时各节点电压变化情况,调节后节点 6

电压为 1.074 p.u.,依旧大于上限值,这是由于此时仅有①、②号风电机组参与电压控制,5 s 后风电机组有功功率满发,无功调节能力非常有限。如图 10(c)所示,6.2 s 后①、②号风电机组无功输出为最大值,③、④号风电机组无功输出为 0。如图 10(d)所示,采用本文所述控制策略进行控制,发挥了其余风电机组的无功调节能力,将节点电压控制在正常范围内。如图 10(e)所示,4 台风电机组均吸收无功调节电压,而且 6.2 s 后①、②号风电机组仍有无功裕度。

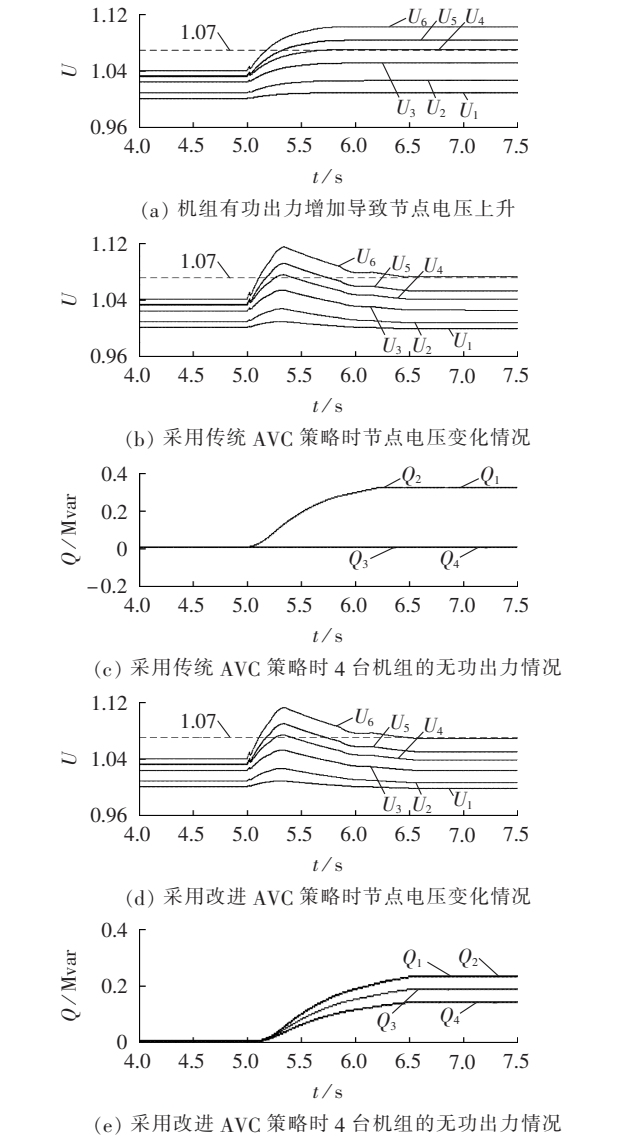


图 10 工况 1 仿真结果
Fig.10 Simulative results for Case 1

4.2 工况 2:配电网负荷变化

设 4 台风电机组运行风速均为 8 m/s,5 s 时配电网节点 5 处负荷由 0.45 MW+j0.09 Mvar 增加到 1.65 MW+j0.21 Mvar。由于负荷的变化,节点 4、5、6 电压超越下限值 0.93 p.u.,如图 11(a)所示。图 11(b)为采用仅考虑并网点电压的传统 AVC 策略时各节点电压变化情况,

此时③号风电机组输出无功功率用以调整节点 4 电压,①、②号风电机组输出无功功率用以调整节点 6 电压。各风电机组出力如图 11(c)所示,此时仅①、②、③号风电机组参与无功调节,且无功输出量大小与节点电压偏差大小有关,节点偏差越大,节点所连风电机组的无功出力越大。由图 11(b)可见,最终节点 4、6 电压处于正常范围内,但节点 5 电压为 0.9203 p.u.,依旧低于下限值。采用本文所述控制策略时,控制系统经过检测计算以电压偏差最严重的节点 5 作为控制点进行电压控制,最终节点电压都在正常范围内,如图 11(d)所示。图 11(e)为风电机组的无功出力情况,4 台风电机组均输出无功功率调节电压,无功输出量大小与灵敏度有关。

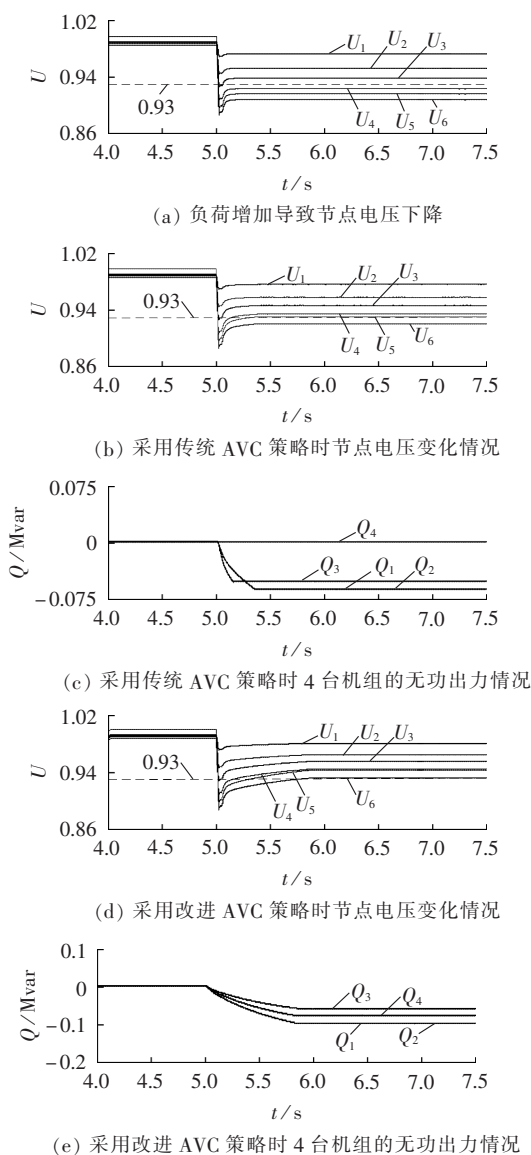


图 11 工况 2 仿真结果

Fig.11 Simulative results for Case 2

5 结论

本文在传统 AVC 策略的基础上,提出了改进的

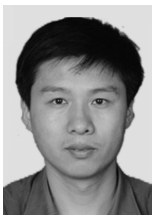
AVC 策略。首先,研究了分散式风电机组接入配电网对节点电压的影响,包括单节点接入和多节点接入。继而分析了双馈机组的无功功率极限,在此基础上,提出了改进的 AVC 策略。改进的 AVC 策略中整定层考虑配电网网络中所有节点的电压情况,将偏差最严重的节点作为控制节点,控制电压不越限得到无功整定值;无功指令值分配分为不同节点之间、同一节点不同机组之间以及机组内部 3 个层次的分配,并分别采用不同的分配算法。改进的 AVC 策略相较于传统 AVC 策略,充分地发挥了双馈机组的无功发生能力,更有效地改善了配电网电压,对分散式风电机组接入配电网无功控制的研究具有一定意义,可以在实践中不断优化。

参考文献:

- [1] 杨俊友,崔嘉,邢作霞,等. 考虑风电功率预测的分散式风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(13):8-15.
YANG Junyou,CUI Jia,XING Zuoxia,et al. Reactive power control strategy for dispersed wind farm considering wind power forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(13):8-15.
- [2] SENJYU T,MIYAZATO Y,YONA A,et al. Optimal distribution voltage control and coordination with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(2):1236-1242.
- [3] WEI Qiao,HARLEY R G,VENAYAGAMOORTHY G K. Coordinated reactive power control of a large wind farm and a STATCOM using heuristic dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(2):493-503.
- [4] 张玮亚,李永丽,孙广宇,等. 基于静止同步补偿器的主动配电网分区电压控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7):1644-1654.
ZHANG Weiya,LI Yongli,SUN Guangyu,et al. Zonal-voltage control for active distribution network based on distributed static synchronous compensator[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(7):1644-1654.
- [5] 贾俊川,刘晋,张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(30):87-92.
JIA Junchuan,LIU Jin,ZHANG Yigong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(30):87-92.
- [6] 杨桦,梁海峰,李庚银. 含双馈感应电机的风电场电压协调控制策略[J]. 电网技术,2011,35(2):121-126.
YANG Hua,LIANG Haifeng,LI Gengyin. A coordinated voltage control strategy for wind farm containing doubly fed induction generators[J]. Power System Technology,2011,35(2):121-126.
- [7] 陈宁,朱凌志,王伟. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J]. 中国电机工程学报,2009,29(10):102-108.
CHEN Ning,ZHU Lingzhi,WANG Wei. Strategy for reactive power control of wind farm for improving voltage stability in wind power integrated region[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(10):102-108.
- [8] 王松岩,朱凌志,陈宁,等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):83-88.
WANG Songyan,ZHU Lingzhi,CHEN Ning,et al. A reactive power control strategy for wind farm based on hierarchical

- layered principle[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(13):83-88.
- [9] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):77-82.
- LANG Yongqiang,ZHANG Xueguang,XU Dianguo,et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(9):77-82.
- [10] 孙伟伟,付蓉,陈永华. 计及无功裕度的双馈风电场无功电压协调控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):81-85.
- SUN Weiwei,FU Rong,CHEN Yonghua. Coordinated var and voltage control of doubly-fed wind farm considering reactive power margin[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):81-85.
- [11] 段建东,杨杉. 基于改进差分进化法的含双馈型风电场的配电网无功优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):123-127,133.
- DUAN Jiandong,YANG Shan. Reactive power optimization based on modified differential evolution algorithm for power distribution system with DFIG wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):123-127,133.
- [12] 袁晓冬,邱志鹏,李群,等. 双馈型风电机组网侧换流器无功功率调节控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):16-19.
- YUAN Xiaodong,QU Zhipeng,LI Qun,et al. Reactive power regulation strategy for grid-side converter of doubly-fed induction generator in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):16-19.
- [13] 于汀,蒲天骄,刘广一,等. 含大规模风电的电网 AVC 研究与应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):81-86.
- YU Ting,PU Tianjiao,LIU Guangyi,et al. AVC research and application for grid with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):81-86.
- [14] 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 of voltage beyond limits[J]. Power System Technology,2010,34(10):140-146.
- [15] 申洪,王伟胜,戴慧珠. 变速恒频风力发电机组的无功功率极限[J]. 电网技术,2003,27(11):60-63.
- SHEN Hong,WANG Weisheng,DAI Huizhu. Reactive power limit of variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. Power System Technology,2003,27(11):60-63.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 供电电压偏差:GB/T 12325—2008[S]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [17] 乔颖,陈惠粉,鲁宗相,等. 双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):15-22.
- QIAO Ying,CHEN Huifen,LU Zongxiang,et al. Application of automatic voltage control system in doubly-fed induction generator wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(5):15-22.
- [18] AMMAR M,JOOS G. Impact of distributed wind generators reactive power behavior on flicker severity[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2013,28(2):425-433.
- [19] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- LIU Qihui. The investigation of operation and control for a variable-speed constant-frequency[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2005.

作者简介:



刘其辉

刘其辉(1974—),男,北京人,副教授,博士,主要研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统运行与控制(E-mail:liuqihuifei@163.com);

赵亚男(1991—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统运行与控制(E-mail:zhaoyan10@163.com)。

AVC strategy for distributed wind-power

LIU Qihui,ZHAO Yanan,MAO Wei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: Since traditional AVC(Automatic Voltage Control) strategy is mainly applied in wind farm and only concerns the voltage of grid-connecting point or single far-end node,an improved AVC strategy is proposed for the distributed wind-power,which takes the node with the most serious voltage deviation as the control point to calculate the reactive power reference. According to the multiple integrating points of distributed wind-power and considering various distribution algorithms,the calculation of reactive-power distribution is divided into three layers:the reactive-power reference distribution among different nodes according to their sensitivities,the reactive-power reference distribution among different units according to their reactive-power capacities,and the prior reactive-power reference distribution to the stator side of DFIG unit. Case simulations verify the correctness and reliability of the improved AVC strategy. Compared with traditional AVC strategy, the improved AVC strategy fully uses the reactive-power output abilities of multiple wind units based on the flexible integration of distributed wind-power to effectively improve the voltage level of distribution network.

Key words: distributed wind-power; reactive power and voltage; AVC; distribution network