

含分布式光伏的配电网谐振与电压越限抑制策略

文/广东电网有限责任公司中山市供电局 于航 夏曼

针对大规模光伏接入配电网所引起的电压越限和谐波谐振问题，提出了一种谐振与电压越限复合抑制策略。该控制策略在光伏逆变器双环控制策略的基础上，增加了无功控制环和虚拟阻尼环，实现了对含分布式光伏的配电网谐波谐振与电压越限的有效治理。

随着环境污染、化石能源枯竭等问题的日渐突显，新能源的发展受到了广泛关注。近年来，太阳能作为一种清洁可再生能源在很多国家得到了迅速发展。在高渗透率并网情况下，分布式光伏间歇性、随机性的大范围出力波动，会导致配电网出现电压升高越限等问题。同时分布式光伏发电系统中存在大量的LCL滤波器，与配网阻抗构成复杂的高阶电网络，这一高阶电网络的存在会导致逆变器输出谐波电流放大，严重时，当分布式光伏并网电压电流谐波频率与该系统固有谐振频率相匹配时，会发生谐振现象。因此，由光伏并网引起电压越限和谐波谐振问题一直是备受关注的方面。

光伏逆变器在发出有功功率的同时，也可以具有无功和谐波电流治理的功能。有专家提出了一种集成有源滤波器功能的光伏并网逆变器控制策略，通过检测负载的无功与谐波电流作为光伏逆变器的补偿电流参考值，实现对配电网电压和谐波的治理功能。但该方法并不能很好地抑制含LCL滤波器光伏逆变器的谐振问题。

针对以上问题，本文提出了一种应对含分布式光伏的配电网谐波谐振与电压越限的复合控制策略。逆变器可以利用 $Q(u)$ 无功曲线自主地吸收感性无功功率，抑制并网点电压上升；同时，加入逆变器侧反馈电流带通滤波的有源阻尼方

法，有效增加系统的阻尼，达到抑制谐振的目的。最后通过Matlab/Simulink的仿真结果验证了所提控制策略的正确性和有效性。

谐振与电压越限复合抑制策略

为应对大规模光伏接入配电网所引起的电压越限和谐波谐振问题，本文在传统逆变器双环控制的基础上，加入了无功控制环和虚拟阻尼环。针对逆变器的无功独立控制，无功控制环引入 $Q(u)$ 无功曲线，逆变器根据 $Q(u)$ 曲线自主输出无功功率调节并网点电压。同时模糊控制器还可实时优化 $Q(u)$ 无功曲线的参考值。针对LCL滤波器引起的光伏逆变器谐波谐振问题，虚拟阻尼环为一个含有二阶带通滤波器的逆变器侧电流反馈回路，有效增加系统的阻尼，达到谐振抑制的目的。光伏逆变器具体控制框图如图1所示。

1. 无功控制环

光伏逆变器一般采用单位功率因数控制方式，即逆变器只输出有功功率，不输出无功功率。事实上可以利用逆变器的剩余容量发出无功功率对电网电压进行调节。目前，针对光伏逆变器的无功控制，德国工程师协会提出了定无功控制，定功率因数控制，可调功率因数控制，基于电压幅值的 $Q(u)$ 控制等4种控制策略。研究表

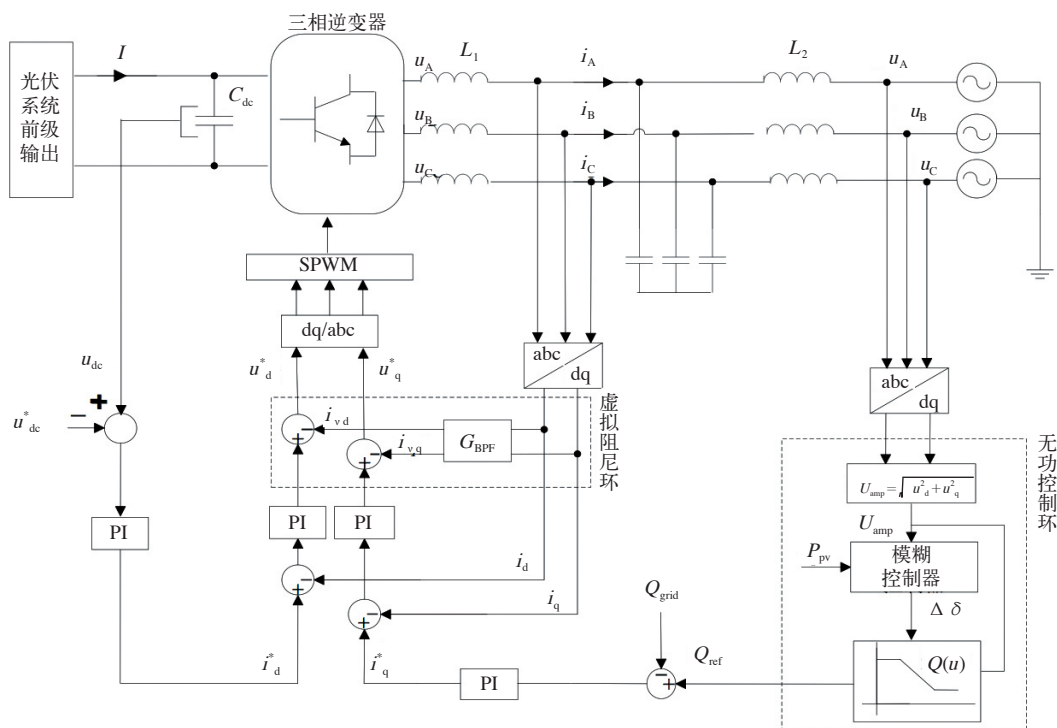
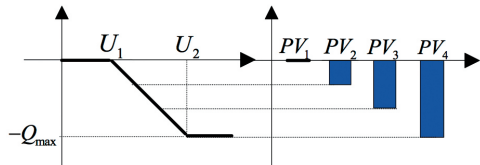


图1 光伏逆变器控制框图

明, 逆变器采用恒无功功率控制和恒功率因数控制时, 在并网点电压并未发生越限时, 逆变器仍需发出一定无功功率, 这将会造成不必要的网损。基于光伏有功出力的变功率因数控制, 根据光伏系统有功出力的大小设定功率因数值, 但当光伏有功出力很大时恰好是用户用电高峰时, 此时并网点电压未越限, 大量的无功输出会给电网带来很大的损耗。

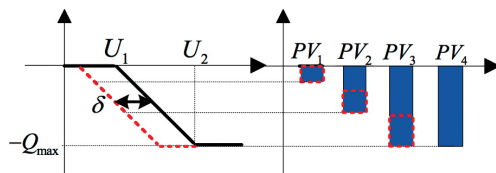
基于并网点电压幅值的 $Q(u)$ 控制,直接采集并网点处电压信息,根据电压幅值的大小合理确定无功参考值。逆变器本地控制器中无功曲线如图2所示,一般有 $U_1=1.03$ 和 $U_2=1.05$ 。

图2 $Q(u)$ 基于电压幅值的控制曲线

通过分析光伏接入对电网电压影响可知,靠近变压器侧的并网点电压几乎保持不变,而接近馈线末端的并网点电压极易越限。因此,即使馈线末端逆变器最大限度地吸收无功功率调节电压,靠近变压器侧的逆变器也不参与电网电压调节,整个光伏系统调压能力较弱。

因此, 针对上述问题, 本策略在逆变器本地控制器中加入模糊控制器, 模糊控制器的输入为

并网点电压 U ，光伏有功出力 P 。输出量 $\Delta \zeta$ 为 $Q(u)$ 曲线沿 X 轴方向的位移。规定向左移动为负，向右移动为正。图3所示为基于电压幅值的 $Q(u)$ 控制曲线图。

图3 基于电压幅值的 $Q(u)$ 控制曲线

输入 U 和 P 的论域空间分别为 $[1.01, 1.05]$ pu和 $[0, 100]$ kW, 对应的模糊子集设为5个语言值为 $\{L, LM, M, MM, H\}$ 和 $\{L, M, H\}$ 。输出量 $\Delta \zeta$ 的论域空间为 $\{-0.01, 0.01\}$, 对应的模糊子集为 $\{NE, ZO, PS\}$ 。

隶属度函数采用灵敏性高的高斯函数。为增强系统的鲁棒性,提高隶属度函数的分辨率,可将M值附近的函数形状取得更陡,模糊前馈控制器的输入输出隶属度函数都采用简单的三角隶属函数,去模糊化方法采用重心法。模糊规则表如表1所示,从表1选取2条极限规则加以说明。

规则1: if P is L and U is H , then $\Delta \zeta$ is NE. 当光伏出力为0, 且并网点电压幅值为1.05时, $Q(u)$ 曲线向 X 轴负方向移动0.01。

规则2: if P is H and U is L , then $\Delta \zeta$ is PS。当光伏出力为100 kW, 且并网点电压幅值

为1.01时, $Q(u)$ 曲线向X轴正方向移动0.01。

表1 模糊规则

P/U	L	LM	M	MM	H
L	PS	Z	Z	NE	NE
M	PS	PS	Z	Z	NE
H	PS	PS	PS	Z	NE

2. 虚拟阻尼环

大功率电压源型并网逆变器系统中主要采用LCL型滤波器,但是LCL滤波器的引入提高了系统阶数,且这种结构在某些频率点处会表现出较低的阻抗甚至零阻抗,进而引起系统的谐振。目前,主要采用有源阻尼的方法对LCL滤波器的谐振进行抑制。采用并网电压或并网电流与滤波电感电流双闭环控制等有源阻尼方法,通过增加虚拟的阻尼实现了对LCL滤波器谐振的抑制,克服了无源阻尼方法将会增加系统的功率损耗,但是与常规控制方法相比,增加了并网点电压或并网电流传感器,提高了成本。

因此,针对含LCL滤波器的光伏逆变器谐波谐振问题,在不改变硬件拓扑也不增加传感器的前提下,虚拟阻尼环添加了一个带有二阶带通滤波器的逆变器侧电流反馈回路,有效增加系统的阻尼,达到谐振抑制的目的。

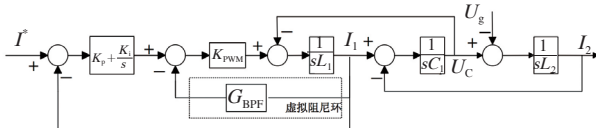


图4 光伏逆变器控制框图

图4所示为加入二阶带通滤波器的逆变器侧电流反馈的光伏逆变器控制框图。未加入二阶带通滤波器时,逆变器侧电流反馈的系统开环传递函数为

$$G_i(s) = G_c(s) \frac{K_{PWM}(L_2CS^2 + 1)}{L_1L_2CS^3 + (L_1 + L_2)S} \quad (1)$$

而加入二阶带通滤波器时,系统的开环传递函数可表示为

$$G_i(s) = G_c(s) \frac{K_{PWM}(L_2CS^2 + 1)}{L_1L_2CS^3 + L_2CS^2G_{BPF}(s) + (L_1 + L_2)S} \quad (2)$$

式(2)中,二阶带通滤波器的表达式为

$$G_{BPF} = \frac{w_0s/Q}{S^2 + w_0s/Q + w_0^2} \quad (3)$$

式中, w_0 为该滤波器的谐振频率, Q 为品质因数。

采用含二阶带通滤波器的逆变器侧电流反馈有源阻尼方案无法实现零极点的完全对消,但在谐振频率处,可以起到增加系统阻尼的作用,使得谐振峰能够被有效抑制,增加系统稳定性。从

变流器控制角度来讲,相当于将基波电流中的谐振成分提取后进行比例控制,引入调制波实现对谐振电流的闭环控制。

图5所示为加入二阶带通滤波器有源阻尼前后系统开环传递函数的伯德图。从图5中可以看到,只采用逆变器侧电流反馈控制时,系统存在明显的谐振点,而当系统另外加入二阶带通滤波器有源阻尼控制时,系统的谐振峰得到了明显的抑制,而且并不影响系统的高频和低频特性。

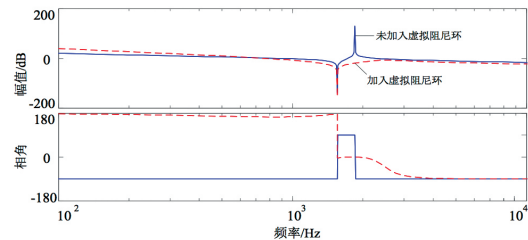


图5 加入虚拟阻尼环前后系统开环传递函数的Bode图

仿真分析

本文采用Matlab/Simulink仿真软件,对两级式光伏发电单元进行建模,搭建了380 V配电系统,模拟光伏系统接入配网末端的环境,利用光伏系统发出无功功率对并网点电压进行支撑。每个光伏系统最大功率 P_m 为100 kW,光照强度0.4 s时为400 W/m², 0.8 s时为800 W/m², 1.2 s时为1 000 W/m²。负荷初始时为50 kW, 1 s后突变为70 kW。仿真参数如表2所示。含光伏配电网仿真结构如图6所示。

表2 仿真参数

参数	数值
电网电压 U_g	380 V
直流侧电源电压 U_{dc}	750 V
逆变器开关频率 f	6 600 Hz
逆变器侧电感 L_1	0.24 mH
滤波电容 C_f	411 μf
网侧电感 L_1	0.06 mH

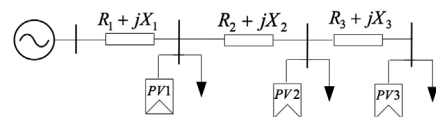


图6 含光伏配电网仿真结构

图7、图8所示为逆变器加入无功控制环后,并网点电压和逆变器的无功输出示意,从两图中可以看出,加入无功控制环节后,逆变器在输出有功功率的同时,也将输出无功功率对并网点电压进行调节。0.4 s时各并网点电压均超过1.01pu,但模糊控制器判定此时无功曲线向X轴正方向移动,因此,逆变器不发出无功功率;0.8 s时,光

照强度增加一倍，光伏逆变器均开始吸收感性无功功率；1 s时，随着负荷的增加，并网点电压开始下降，逆变器吸收的感性无功功率也随之开始减少；1.2 s时，逆变器的无功输出随着光照强度的增大而增大。由此可见，逆变器加入无功控制环节后，可有效抑制并网点电压越限。

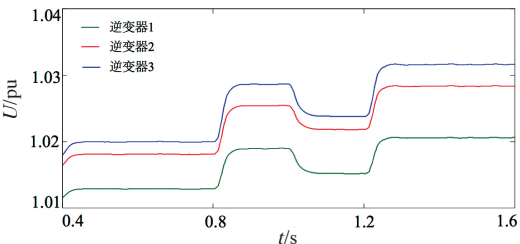


图7 并网点电压示意图

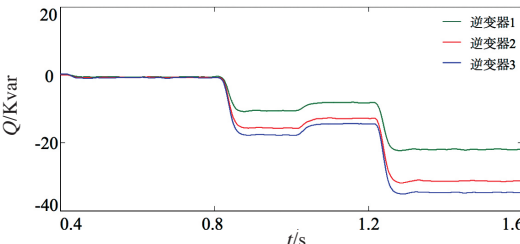


图8 光伏集群无功输出示意图

图9为PV3并网点电流示意图，图10、图11所示为加入本文所提虚拟阻尼环前后，逆变器3的入网电流THD。从中可以看出，未加入虚拟阻尼环时，处于LCL谐振频率附近的逆变器入网电流谐波被明显放大。而加入虚拟阻尼环后，入网电流谐波畸变率明显下降，有效地抑制了系统谐波谐振，证明了本文所提虚拟阻尼环的可行性。

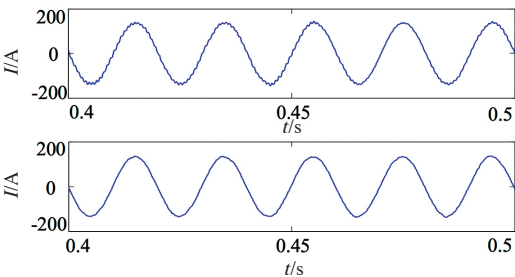


图9 PV3并网点电流示意图

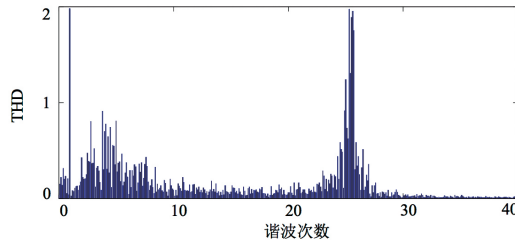


图10 PV3加入虚拟阻尼环前的入网电流THD

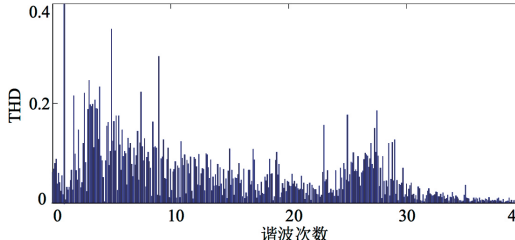


图11 PV3加入虚拟阻尼环后入网电流的THD

结束语

本文在传统逆变器双闭环控制的基础上，通过引入无功控制环和虚拟阻尼环，提出了一种含分布式光伏的配电网谐振与电压越限负荷抑制策略。EA

(上接第31页)

2. 算例分析

针对上述6种情形，计算结果如表2所示。

表2 集中配置和分散配置计算结果

方案	TSC/MV·A	方案	TSC/MV·A
情形1	218.90	情形4	231.22
情形2	229.80	情形5	234.71
情形3	234.24	情形6	237.23

由表2中结果可知，分散配置整体TSC要优于集中配置，因此，DG接入系统时需要进行分散优化配置，更易于负荷转供。

结束语

本文提出了一种考虑分布式电源的配电网缸垫能力分析，主要结论如下：

1) 提出了基于N-1的含DG的配电网供电能力分析，综合考虑主变N-1约束、DG的N-1约束和联络线容量约束，求取结果清晰且准确。

2) 合理的对DG进行分散配置有利于提高配电网的最大供电能力，在实际系统中需综合考虑各种DG接入情形，综合比较供电能力，进而找出最优解。EA