

大型光伏电站无功电压控制策略

周 林, 邵念彬

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 对于大型光伏电站,有功出力的波动不仅会造成并网点电压越限,也会造成电站内部局部电压过高,导致保护动作,使得逆变器脱网。分析了光伏电站并网点电压及站内各光伏发电单元并网电压的影响因素,提出了一种考虑站内电压分布的大型光伏电站无功电压控制策略。该控制方法通过实时检测并网点电压,与参考值比较并通过 PI 控制器自动获取维持并网点电压所需的无功需求量,实现并网点电压的动态调节;通过实时调节逆变器的无功输出,实现站内电压均匀分布。应用灵敏度的分析方法表示无功与电压间的关系,给出了 PI 控制器参数的设计过程,并将以站内电压均匀分布为目标的无功优化问题转化为可以快速准确求解的带约束条件的非线性规划模型;对该模型进行求解计算出无功补偿装置及各组光伏发电单元的无功参考量,在保证并网点电压稳定的基础上,改善站内电压分布,保证光伏电站的稳定运行。最后通过仿真计算,验证了该控制策略的正确性和可行性。

关键词: 光伏; 发电; 大型光伏电站; 电压波动; 无功控制; 电压控制; 灵敏度; 电压分布

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.018

0 引言

近年来随着光伏产业迅速发展,系统成本不断降低,光伏并网技术逐渐成熟,建设大型并网光伏电站成为大规模利用太阳能的有效方式^[1]。不同于分布式光伏发电,大型光伏电站多建立在荒漠地区,当地负荷水平较低,所接入地区电网的短路容量较小,大量的光伏电力需要高压长距离输电线路外送^[2-3]。由于光伏发电受光照影响较大,光照的波动会引起有功输出的波动,从而导致并网点电压波动甚至越限^[4],因此大型光伏电站必须具备无功电压控制能力^[5]。

目前针对光伏电站电压控制的研究多集中在分布式发电领域。分布式光伏发电的调压方式主要有利用储能装置^[6-7]、无功补偿装置、逆变器无功功率控制^[8]。储能装置可以平抑有功波动但会增加系统成本,且控制复杂;无功补偿装置调压忽略了逆变器的无功输出能力;逆变器无功功率控制主要针对本地负载的无功补偿,不能实现光伏电站的无功独立控制。此外,德国电气工程师协会提出了适用于分布式光伏发电的 4 种无功控制策略:恒无功功率 Q 控制、恒功率因数 $\cos\varphi$ 控制、基于光伏有功出力的 $\cos\varphi(P)$ 控制及基于并网点电压幅值的 $Q(U)$ 控制策略^[9]。但这 4 种控制策略仅针对单台逆变器,并不适用于大型光伏电站。

不同于分布式光伏发电,大型光伏电站内部无功

源包括逆变器和无功补偿装置,因此大型光伏电站的无功电压控制必然涉及逆变器与无功补偿装置以及各逆变器的协调控制。文献^[10]提出了以并网点电压以及并网点功率因数为控制目标的控制策略;文献^[11]将大型光伏电站内部的无功源分为 3 层,提出了 3 层无功控制策略。但以上文献都只针对并网点电压进行控制,未研究电站内部的电压分布情况。

大型光伏电站通常由多组光伏发电单元 PVGU (PV Generation Unit) 组成,每组 PVGU 分别通过升压变压器汇入送端配电站,然后以相应的电压等级实现远距离高压交流输电^[12]。虽然目前尚无规范对站内 PVGU 并网电压做出具体规定,但由于站内集电线路的存在,随着有功出力的增加,可能会导致线路末端 PVGU 电压过高,从而导致保护装置动作,使得逆变器脱网,不利于光伏电站稳定运行。考虑到在正常工况下,无功电压之间呈现近似线性关系,本文基于无功电压灵敏度分析方法,提出了一种考虑站内电压分布的大型光伏电站无功电压控制策略。该控制策略通过优化计算对各台逆变器及无功补偿装置的无功出力进行协调,在并网点电压动态调节的基础上,改善站内电压分布,最后通过相应算例进行了仿真验证。

1 大型光伏电站原理

1.1 大型光伏电站拓扑结构

大型光伏电站多采用逆变器并联集中并网,通过升压站变压器实现高压交流输电^[13]。以国电蒙电巴彦淖尔市乌拉特后旗光伏发电项目为例,其拓扑结构如图 1 所示。图中 $U_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 组

收稿日期:2015-04-11;修回日期:2016-01-30

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A301)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA-05A301)

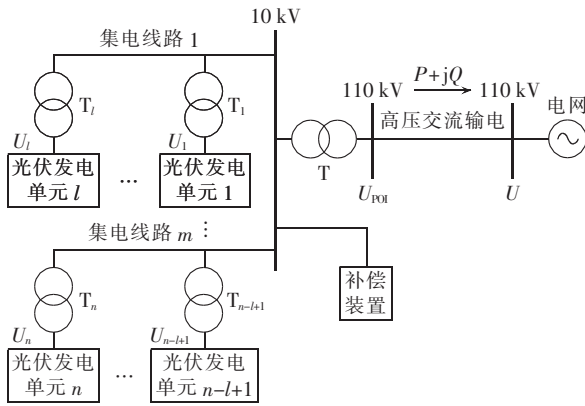


图 1 大型光伏电站拓扑结构示意图

Fig.1 Topology of large-scale grid-connected photovoltaic power plant

PVGU 升压变压器低压侧电压; U_{POI} 表示主变压器高压侧(并网点)电压; U 表示电网电压。无功补偿装置装设在主变压器低压侧。

该光伏电站由多组 PVGU 并联组成。光伏发电单元将直流电能逆变为 270 V 交流电,为降低电站内部损耗,每组 PVGU 配置 1 台 0.27 kV/10 kV 升压变压器(T_i)。由于光伏阵列占地面积较大,各组 PVGU 之间距离较远,需要 m 回集电线路(每回集电线路串联 l 组光伏发电单元)将电能汇集,接入主变压器(T)低压侧,由主变压器将电能集中升压至 110 kV,通过送出线路输送至电网。每组 PVGU 由 2 台 500 kW 逆变器并联组成。逆变器采用单级结构,光伏阵列将太阳能转化为直流电能,通过直流侧电容接入逆变器,再经由 LCL 滤波器接入升压变压器低压侧。每台并网逆变器均采用相同的结构、参数和控制策略,当一台并网逆变器出现故障时,不影响剩余各组的工作。

1.2 并网逆变器控制系统

针对 LCL 型并网逆变器,可通过控制并网侧电流实现逆变并网^[14-16]。为增加系统的稳定性,采用电容电流有源阻尼控制策略^[17]。完整控制框图如图 2 所示^[18-20]。

图中, u_{pv} 和 i_{pv} 分别表示逆变器直流侧电压、电流; P^* 和 Q^* 分别表示有功参考和无功参考; $i_{sq\beta}$ 和 $u_{sq\beta}$ 分别表示实际的并网电流和并网电压, $i_{sq\beta ref}$ 表示电流参考; k_d 表示电容电流有源阻尼因子。

该控制策略包括直流侧最大功率点跟踪(MPPT)和电流控制环两部分。所有控制过程完全在 $\alpha\beta$ 坐标系下进行,省去了锁相环节以及电流环解耦控制。MPPT 过程采用扰动观察法,可给出有功参考 P^* ,无功参考 Q^* 由外部给定或者由有功参考 P^* 乘以功率因数 $\cos\varphi$ 获得;根据瞬时功率理论可由有功参考和无功参考计算出电流参考 $i_{sq\beta ref}$ 。电流环采用准 PR 控制器^[20],可以实现交流信号的无差调节。在该控制策略下,通过给定 Q^* 或者功率因数 $\cos\varphi$ 就可以实现逆变器无功功率的独立控制。

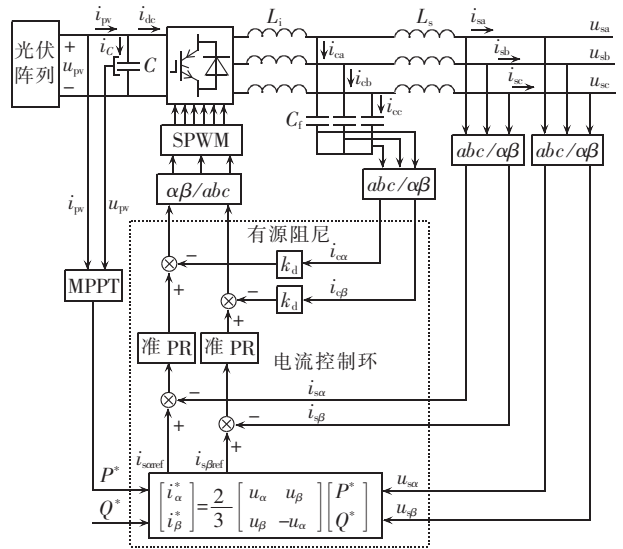


图 2 并网逆变器控制系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of grid-connected inverter control system

2 光伏电站输出功率与电压关系分析

建立图 1 的等值模型,如图 3 所示。为简化分析,忽略 PVGU 升压变压器激磁导纳。图中, $P_i + jQ_i$ 表示第 i 组 PVGU 所发出功率; Z_i 表示第 i 组 PVGU 与第 $i-1$ 组 PVGU 之间的线路阻抗; Z_{Ti} 表示第 i 组 PVGU 的升压变压器的等效阻抗; U_{i1} 与 U_{i2} 分别表示第 i 组升压变压器低压侧电压和高压侧电压; U_{2POI} 表示主变压器低压侧电压。

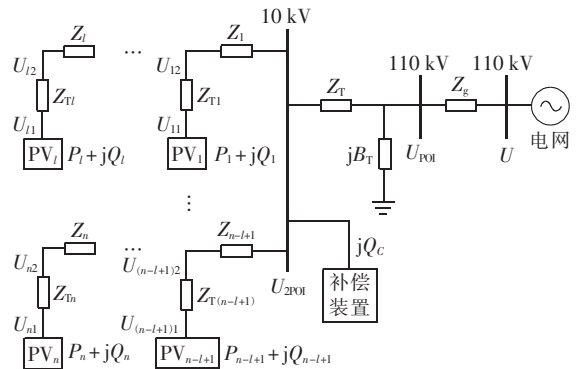


图 3 大型光伏电站等值模型

Fig.3 Equivalent model of large-scale grid-connected photovoltaic power plant

(1) 光伏电站并网点电压分析。

以电网电压 U 为基准,并网点电压 U_{POI} 可近似表示为式(1)(以下过程均以标幺值计算)。

$$U_{POI} \approx U + \frac{(\sum P_i - \Delta P)R_g + (\sum Q_i + Q_C - \Delta Q)X_g}{U} \quad (1)$$

其中, $Z_g = R_g + jX_g$ 为送出线路阻抗; ΔP 、 ΔQ 分别为站内集电线路以及变压器阻抗造成的有功损耗和无功损耗; $\sum P_i$ 、 $\sum Q_i$ 分别为光伏电站的有功输出和无功输出; Q_C 为无功补偿装置无功输出。

由式(1)可知,当光伏电站有功输出 $\sum P_i$ 发生波动时,会造成并网点电压波动,对此可以通过调节站内无功输出 $\sum Q_i$ 以及无功补偿装置无功输出 Q_C 对并网点电压进行调节。

(2)光伏发电单元并网电压分析。

因每回集电线路结构相同,因此取第 1 回集电线路进行分析。忽略电压降横分量及导纳参数,第 i 组 PVGU 并网电压 U_{i1} 可表示如下:

$$\begin{cases} U_{i1} = \frac{P_i R_{Ti} + Q_i X_{Ti}}{U_{i2}} + U_{i2} \\ U_{i2} = \frac{\left(\sum_{k=i}^l P_k\right) R_i + \left(\sum_{k=i}^l Q_k\right) X_i}{U_{(i-1)2}} + U_{(i-1)2} \\ U_{i2} \approx U_{2POI} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Z_i = R_i + jX_i$; $Z_{Ti} = R_{Ti} + jX_{Ti}$ 。

由式(2)可知光伏电站内部 PVGU 并网电压不仅与光伏电站并网点电压有关,而且与自身输出功率和其他发电单元输出功率密切相关。且在集电线路末端的光伏发电单元的电压偏差最大,最易发生越限。同时由式(2)可知,可利用各台逆变器的无功输出 Q_i ,对站内电压进行优化。

3 无功电压控制策略

3.1 不同无功源无功输出对并网点电压影响分析

光伏电站内部无功源包括无功补偿装置和 PVGU,为研究不同 PVGU 以及无功补偿装置无功输出对并网点电压的影响,建立图 1 的等效电路,如图 4 所示。第 i 组光伏发电单元和无功补偿装置分别通过等效阻抗 $R_{i-POI} + jX_{i-POI}$ 、 $R_{C-POI} + jX_{C-POI}$ 连接至并网点。 $P_i + jQ_i$ 、 Q_C 、 $P'_i + jQ'_i$ 、 Q'_C 分别为第 i 组 PVGU 和无功补偿装置所发功率和输送至并网点的功率。

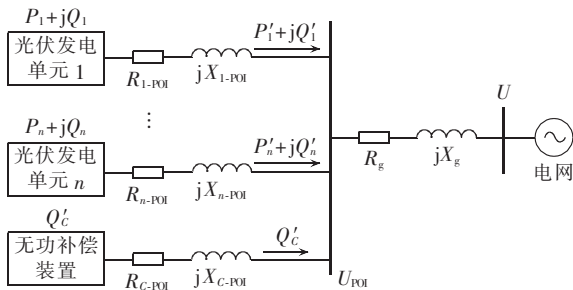


图 4 大型光伏电站简化示意图

Fig.4 Simplified diagram of large-scale grid-connected photovoltaic power plant

第 i 组 PVGU 输送至并网点功率可表示为:

$$P'_i + jQ'_i = P_i + jQ_i - \left(\frac{P_i + jQ_i}{U_{POI}}\right)^2 (R_{i-POI} + jX_{i-POI}) \quad (3)$$

光伏电站并网点电压为:

$$U_{POI} = U + \frac{\sum_{i=1}^n P'_i R_g + \left(Q'_C + \sum_{i=1}^n Q'_i\right) X_g}{U} \quad (4)$$

则第 i 组 PVGU 无功输出对于并网点电压的影响可表示如下(忽略电阻):

$$\frac{\partial U_{POI}}{\partial Q_i} \approx \frac{X_g}{U} \left(1 - 2 \frac{P_i X_{i-POI} + Q_i X_{i-POI}}{U_{POI}^2}\right) \quad (5)$$

由于并网点额定电压为 110 kV,而每个光伏发电单元额定容量为 1 MW,且线路阻抗也较小,因此有 $2(P_i X_{i-POI} + Q_i X_{i-POI})/U_{POI}^2 \ll 1$,所以有:

$$\frac{\partial U_{POI}}{\partial Q_i} \approx X_g / U \quad (6)$$

同理,可得无功补偿装置无功输出对于并网点电压影响:

$$\frac{\partial U_{POI}}{\partial Q_C} \approx X_g / U \quad (7)$$

即站内各光伏发电单元以及无功补偿装置无功输出对于并网点电压的影响近似相等。因此光伏电站并网点电压波动量与站内各无功源无功输出变化量之间的关系可表示为:

$$\Delta U_{POI} = S_{VQ} \sum Q \quad (8)$$

其中, S_{VQ} 为各无功源对并网点电压的无功电压灵敏度, $S_{VQ} = X_g / U$; $\sum Q$ 为站内总的无功输出,包括光伏发电单元和无功补偿装置。

3.2 并网点电压控制

在静态稳定的前提下,可认为光伏电站的无功输出变化量与并网点电压幅值波动量之间近似呈线性关系,因此可以采用 PI 控制器实现电压幅值的无差控制。将逆变器和 SVG 等效为惯性环节,并忽略通信延时,根据式(8)可得并网点无功电压控制框图,如图 5 所示。其中, k_p, k_i 为 PI 控制器参数; $1/(Ts+1)$ 为逆变器和 SVG 等效; Q_{ref} 为将并网点电压维持在范围内所需的无功参考; $\sum Q$ 为逆变器和 SVG 实际发出无功量; $f(P)$ 为扰动量,表示有功输出对并网点电压影响。

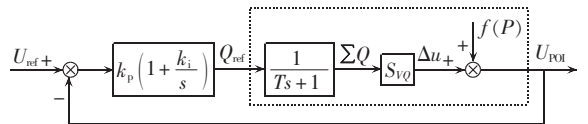


图 5 并网点电压控制框图

Fig.5 Block diagram of PCC voltage control

该控制框图通过实时检测并网点电压 U_{POI} ,与参考电压 U_{ref} 比较通过 PI 控制器获取维持并网点电压所需的无功参考量 Q_{ref} ,通过调节逆变器和无功补偿装置的无功输出 $\sum Q$ 实现并网点电压的调节。

由图 5 可知, U_{ref} 到 Q_{ref} 的闭环传递函数为:

$$\frac{Q_{ref}}{U_{ref}} = \frac{k_p [Ts^2 + (k_i T + 1)s + k_i]}{Ts^2 + (k_p S_{VQ} + 1)s + k_p k_i S_{VQ}} \quad (9)$$

分子、分母都为 2 阶,为使得无功参考较快跟随电压变化,可将系统校正为比例环节:

$$\begin{cases} k_i T + 1 = k_p S_{VQ} + 1 \\ k_i = k_p k_i S_{VQ} \end{cases} \quad (10)$$

可得:

$$k_p=1/S_{VQ}, k_i=1/T \quad (11)$$

此时,电压参考 U_{ref} 到并网点电压 U_{POI} 的开环传递函数为:

$$\frac{U_{POI}}{U_{ref}}=k_p\left(1+\frac{k_i}{s}\right)\frac{S_{VQ}}{Ts+1}=\frac{1}{Ts} \quad (12)$$

这是一个积分环节,此时系统稳定且具有良好的动态性能。

3.3 站内无功源无功分配

3.3.1 分配策略

由 PI 控制器获取的无功参考 Q_{ref} 需由光伏电站内部逆变器和无功补偿装置提供。因此大型光伏电站的无功电压控制必然涉及逆变器与无功补偿装置以及各逆变器的协调控制。鉴于静止无功发生器 SVG 在无功补偿中的动态无功调节能力,这里仅以 SVG 代替无功补偿装置进行分析与设计。由于 SVG 和逆变器都可以通过调节无功功率参考 Q_{ref} 实现无功输出,基于此本文提出如图 5 所示的分配策略。

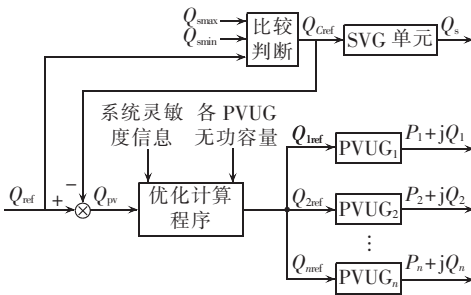


图 6 无功分配策略示意图

Fig.6 Schematic diagram of reactive-power distribution strategy

该分配策略包括 PVGU 和无功补偿装置之间的分配以及各组 PVGU 之间的分配。为减少网损,优先利用 SVG 进行无功输出,缺额部分由 PVGU 提供。SVG 和各组 PVGU 总的无功参考量 Q_{Cref} 、 Q_{pw} 按以下原则分配。

当总的无功功率参考量 $Q_{min} \leq Q_{ref} \leq Q_{max}$ 时,有:

$$\begin{cases} Q_{Cref}=Q_{ref} \\ Q_{pw}=0 \end{cases} \quad (13)$$

当总的无功功率参考量 $Q_{ref} > Q_{max}$ 或者 $Q_{ref} < Q_{min}$ 时,有:

$$\begin{cases} Q_{Cref}=Q_{max} \text{ 或 } Q_{Cref}=Q_{min} \\ Q_{pw}=Q_{ref}-Q_{Cref} \end{cases} \quad (14)$$

其中, Q_{min} 、 Q_{max} 分别为 SVG 的容性无功容量和感性无功容量。

由于站内各组 PVGU 的并网电压可能出现越限的情况,本文拟利用逆变器的无功输出改善站内节点电压,因此各组 PVGU 无功参考 Q_{iref} 通过优化计算程序获取。

3.3.2 优化计算

在正常工况下随着光照增强,集电线路末梢的 PVGU 可能出现电压过高的情况,当电网电压出现波动会导致继电保护装置动作,恶劣情况下可能引起连锁反应,导致逆变器大规模脱网。因此本文对各组 PVGU 的无功参考量 Q_{iref} 进行优化,根据站内电压情况,实时调节各组 PVGU 的无功输出,在保证光伏电站总无功需求的同时,实现站内各 PVGU 并网电压差异最小,从而改善站内电压分布。

各 PVGU 之间通过线路阻抗相互影响,而等效阻抗不易计算,本文应用无功电压灵敏度系数来表示各组 PVGU 无功输出与并网电压之间的关系。为避免无功注入节点的影响,本文根据文献[21]所提出的“降阶雅可比矩阵算法”求得只包含所研究节点功率/电压灵敏度信息的雅可比矩阵 J_S :

$$J_S^{-1} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,2(n+2)} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{2(n+2),1} & \cdots & A_{2(n+2),2(n+2)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

第 j 组 PVGU 对于第 i 组 PVGU 的无功电压灵敏度为 $S_{ji}=A_{2n+2+j,2n+2+i}$ ($i < n, j < n$)。

忽略有功波动对于电压的影响,第 i 组 PVGU 并网电压可近似表示为:

$$U_i \approx U_1 + \sum_{j=1}^n S_{ji} Q_{jref} \quad (16)$$

其中, n 为站内 PVGU 组数; U_i 为调节后第 i 组 PVGU 并网电压; Q_{iref} 为第 j 组 PVGU 的无功参考量; U_1 为实际电压。以站内各组 PVGU 电压的方差最小为目标,则目标函数为:

$$\min f = \sum_{i=1}^n \left(U_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \right)^2 \quad (17)$$

等式约束:

$$\sum_{i=1}^n Q_{iref} = Q_{pw} \quad (18)$$

其中, Q_{iref} 为第 i 组 PVGU 的无功参考; Q_{pw} 为所有 PVGU 总的无功参考量,具体取值见式(13)、(14)。

不等式约束:

$$Q_{imin} \leq Q_{iref} \leq Q_{imax} \quad (19)$$

其中, Q_{imin} 、 Q_{imax} 分别为第 i 组 PVGU 的容性无功容量和感性无功容量,其值受到逆变器额定容量的约束。

采用全局序列二次规划法(SQP)对以上带约束条件的非线性规划问题进行求解,便可求得维持并网电压恒定且站内电压均匀分布时各 PVGU 的无功参考值。具体优化算法参见文献[22]。

3.4 无功电压控制策略完整框图

结合图 5、图 6,可得无功电压控制策略的完整框图,如图 7 所示。

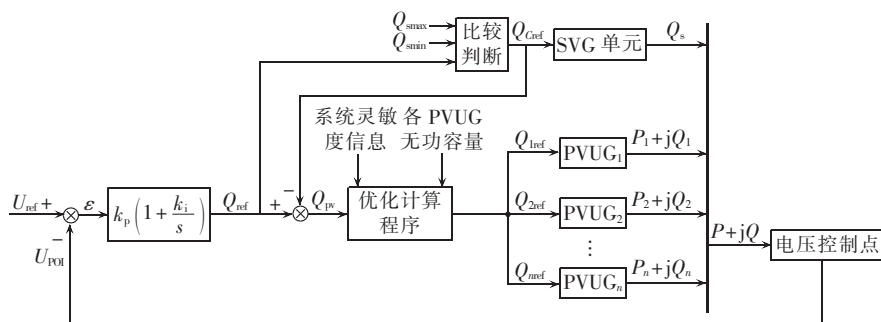


图 7 无功电压控制策略示意图

Fig.7 Schematic diagram of reactive-power and voltage control strategy

4 算例仿真

4.1 算例说明

本文利用 MATLAB/Simulink 建立如图 8 所示的光伏电站并网运行仿真模型。光伏电站总装机容量 60 MW, 共有 4 回集电线路, 每回集电线路串联 10 组 PVGU, 每组 PVGU 容量 1.5 MW (为便于仿真验证, 采用 1 台 1.5 MW 逆变器), 通过 0.29 kV/10 kV 升压变压器升压至 10 kV 接入集电线路。相邻 2 组 PVGU 之间距离为 1.2 km, 选用 YJV23-8.7/10、3×150 mm² 电缆连接。主变压器容量 60 MW, 送出线路长度 80 km, 采用 LGJ185 型号导线。SVG 容量为 -4~6 Mvar。

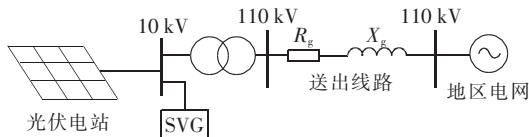


图 8 仿真电路图

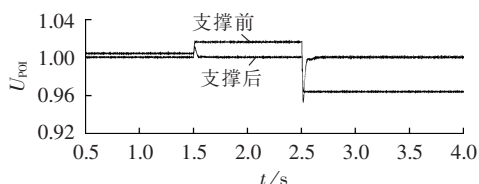
Fig.8 Simulation circuit

仿真过程分为 3 个阶段, 仿真开始时光照强度 $S_{ref}=200 \text{ W/m}^2$, 各光伏发电单元开始工作, 在 1.5 s 时光照强度突增至 $S_{ref}=600 \text{ W/m}^2$, 到 2.5 s 时光照强度又由 $S_{ref}=600 \text{ W/m}^2$ 突增至 $S_{ref}=900 \text{ W/m}^2$ 。

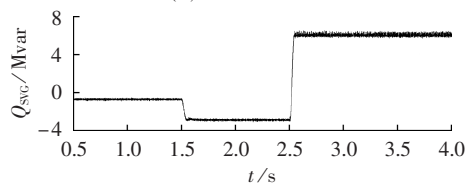
4.2 并网点电压分析

图 9(a)(b)(c) 分别为并网点电压变化情况、SVG 无功输出以及光伏发电单元总的无功参考量 (其中, 电压为标幺值, 下同)。由图 9(a) 可知, 未采用无功补偿策略时, 在 0~1.5 s, 光伏出力较弱, 并网点电压近似等于额定值; 在 1.5~2.5 s, 由于光照增强, 光伏出力增加, 引起并网点电压上升至 1.018 p.u.; 在 2.5~3.5 s, 由于光照进一步增强, 光伏电站出力达到最大, 此时站内无功消耗也达到最大, 有功的影响小于逆无功的影响, 导致并网点电压下降至 0.962 p.u.。采用无功控制策略后, 可以将并网点电压稳定在参考值 1 p.u., 且具有良好的动态性能。

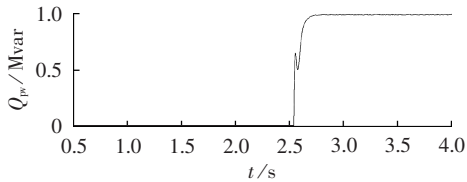
由图 9(b) 和 (c) 可知, 在 0~1.5 s 和 1.5~2.5 s, 由



(a) 110 kV 母线电压



(b) SVG 无功输出



(c) 所有 PVGU 总的无功参考量

图 9 光照变化时仿真结果

Fig.9 Simulative results for illumination change

于并网点电压偏离参考值较小, 所需无功量分别为 -0.6 Mvar 和 -3 Mvar, 小于 SVG 的容性无功补偿容量, 此时由 SVG 承担所有的无功需求, 光伏发电单元总的无功参考为 0 Mvar; 在 2.5~4.5 s, 由于并网点电压大幅跌落, 需大量的无功支撑, 此时 SVG 以最大感性无功容量 (6 Mvar) 输出, 剩余 0.96 Mvar 的无功由 PVGU 提供。

4.3 各光伏发电单元并网电压分析

由于各集电线路参数相同, 所串联 PVGU 数也相同, 因此取其中一路进行分析。

图 10 所示为一回集电线路中各发电单元在不同光照下的并网电压情况, 其中光伏发电单元组号按照到升压站距离由小到大依次排列, 1 号距升压站最近, 10 号距升压站最远。由图 10(a) 可知, 当光照强度为 200 W/m^2 时, 各发电单元之间电压都在参考值附近。当光照强度升为 600 W/m^2 时, 由于有功出力的增加, 各 PVGU 并网电压明显上升, 其中第 10

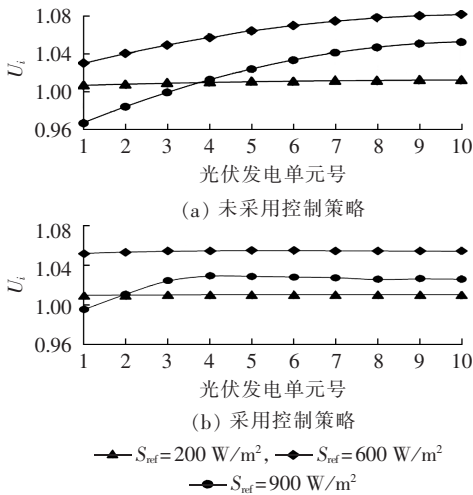


图 10 各光伏发电单元并网电压
Fig.10 Grid-connecting voltage of each photovoltaic unit

组电压达到 1.08 p.u.,波动幅度为 0.07 p.u.,当电网电压发生波动时,可能导致该组保护装置动作,甚至引起连锁反应,导致多台逆变器脱网。当光照强度继续上升至 900 W/m^2 时,由于并网点电压下降,使得各 PVGU 出口电压降低,其中第 1 组 PVGU 出口电压降至 0.97 p.u.,可能会导致欠压保护动作;另外此时线路首尾两端的电压差达到最大,约为 0.08 p.u.,不利于保护装置的整定。

采用本文提出的控制策略后,各 PVGU 并网电压明显改善,结果如图 10(b)所示。优化后的各 PVGU 的无功出力如表 1 所示。在 $S_{ref}=200 \text{ W/m}^2$ 及 $S_{ref}=600 \text{ W/m}^2$ 时,并网点所需无功仅由 SVG 提供,各 PVGU 总的无功参考为 0 Mvar,PVGU 之间相互支撑。在 $S_{ref}=200 \text{ W/m}^2$ 时,由于有功出力较弱,控制前后各组 PVGU 电压变化不明显。当 $S_{ref}=600 \text{ W/m}^2$ 时,经优化计算,前 4 组 PVGU 发出感性无功,线路中后 6 组 PVGU 吸收感性无功,使得线路电压 1.05 p.u. 附近平均分布。当 $S_{ref}=900 \text{ W/m}^2$ 时,SVG

表 1 各 PVGU 不同光照下无功出力
Table 1 Reactive-power output of each photovoltaic unit

光伏发电单元号	各 PVGU 无功出力/kvar		
	$S_{ref}=200 \text{ W/m}^2$	$S_{ref}=600 \text{ W/m}^2$	$S_{ref}=900 \text{ W/m}^2$
1	63.1	618.6	653.8
2	43.2	432.2	651.4
3	25.4	261.5	408.4
4	10.0	108.2	193.8
5	-3.3	-25.8	8.6
6	-14.3	-139.6	-146.9
7	-23.3	-231.8	-272.1
8	-29.9	-301.8	-366.4
9	-34.3	-349.0	-429.5
10	-36.6	-372.5	-461.1
总计	0	0	240.0

无功容量不足以支撑并网点电压,此时需要 PVGU 提供额外的感性无功;经过优化计算,前 5 组电压较低的 PVGU 发出感性无功,后 5 组吸收感性无功,无功总和为 240 kvar,4 回集电线路共提供无功 960 kvar。此时线路首端 PVGU 电压被抬升至 0.99 p.u.,末端电压降至 1.028 p.u. 左右,线路中最大电压差降至 0.04 p.u.。可见,采用无功控制策略后,可以明显改善电站内部各 PVGU 并网电压,保证光伏电站的稳定运行。

采用无功控制策略前后站内有功损耗情况如图 11 所示,可知采用该控制策略后,站内有功网损并未明显增加。

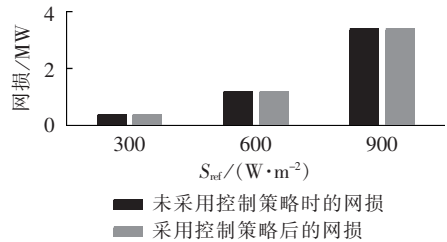


图 11 采用控制策略前后站内网损比较
Fig.11 Comparison of in-station power loss between with and without control strategy

5 结论

通过对无功电压控制策略的研究得出以下结论。

a. 由于集电线路阻抗的存在,站内各 PVGU 并网电压会随着到升压站的距离的增加而升高,可能导致保护装置动作,使逆变器脱网。且随着光照的增强,集电线路两端的电压差逐渐增大,不利于保护装置的整定。

b. 随着线路阻抗或有功出力无功出力的变化,系统的灵敏度系数矩阵会发生改变,但变化不大。

c. 利用本文所提出的控制策略可以实现并网点电压的动态调节,并能改善光伏电站内部的电压分布情况,从而保证光伏电站的稳定运行。

参考文献:

[1] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化,2011,35(12):101-107.
ZHAO Zhengming,LEI Yi,HE Fanbo,et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(12):101-107.

[2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-8.
DING Ming,WANG Weisheng,WANG Xiuli,et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):1-8.

[3] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.

- CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [4] 裴玮, 孔力, 齐智平. 光伏发电参与配电网电压调节的控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1629-1635.
- PEI Wei, KONG Li, QI Zhiping. Cooperative voltage regulation strategy in distribution network with high penetration level of PV generations[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(11): 1629-1635.
- [5] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定: Q/GDW617—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] HASHEMI S, OSTERGAARD J, YANG G. Effect of reactive power management of PV inverters on need for energy storage [C]//Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Tampa, Florida, USA: IEEE, 2013: 2304-2308.
- [7] 张卫东, 刘祖明, 申兰先. 利用储能平抑波动的光伏柔性并网研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 106-111.
- ZHANG Weidong, LIU Zuming, SHEN Lanxian. Flexible grid-connection of photovoltaic power generation system with energy storage system for fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 106-111.
- [8] 汪海宁, 舒建徽, 张国荣, 等. 光伏并网发电及无功补偿的统一控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 114-118.
- WANG Haining, SHU Jianhui, ZHANG Guorong, et al. Unitive control of PV grid connected generation and reactive compensation [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 114-118.
- [9] DEMIROK E, CASADO GONZ'ALEZ P, FREDERIKSEN K H B, et al. Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2011, 1(2): 174-182.
- [10] 葛虎, 毕锐, 徐志成, 等. 大型光伏电站无功电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 45-51.
- GE Hu, BI Rui, XU Zhicheng, et al. Research on reactive power and voltage control of large-scale photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 45-51.
- [11] 晁阳. 并网光伏发电系统无功电压控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- CHAO Yang. The research of reactive power and voltage control for grid-connected photovoltaic generating systems [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [12] 周林, 张密, 居秀丽, 等. 电网阻抗对大型并网光伏系统稳定性影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 34-41.
- ZHOU Lin, ZHANG Mi, JU Xiuli, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic plants due to grid impedances [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 34-41.
- [13] INZUNZA R, SUMIYA T, FUJII Y, et al. Parallel connection of grid-connected LCL inverters for MW-scaled photovoltaic systems [C]//Proceedings of IEEE International Power Electronics Conference. Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 1988-1993.
- [14] 李军, 李玉玲, 陈国柱. 无阻尼 LCL 滤波器的并网变流器稳定性控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 110-116.
- LI Jun, LI Yuling, CHEN Guozhu. A stability control strategy for PWM converter with undamped LCL-filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 110-116.
- [15] 周林, 龙崐平, 张密, 等. 带 LCL 滤波器的单相并网逆变器低频振荡现象分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 67-71, 79.
- ZHOU Lin, LONG Yanping, ZHANG Mi, et al. Analysis of low frequency oscillation in single-phase grid-connected inverter with LCL filter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 67-71, 79.
- [16] 叶曙光, 胡蕊, 刘钊, 等. 基于 LCL 滤波器的双向储能变流器研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 88-92.
- YE Shuguang, HU Rui, LIU Zhao, et al. Bi-directional power conversion system based on LCL filter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 88-92.
- [17] 徐志英, 许爱国, 谢少军. 采用 LCL 滤波的并网逆变器双闭环入网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 36-41.
- XU Zhiying, XU Aiguo, XIE Shaojun. Dual-loop grid current control technique for grid-connected inverter using an LCL filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 36-41.
- [18] 周林, 晁阳, 廖波, 等. 低压网络中并网光伏逆变器调压策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2427-2432.
- ZHOU Lin, CHAO Yang, LIAO Bo, et al. A voltage regulation strategy by grid-connected PV inverters in low-voltage networks [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2427-2432.
- [19] 周林, 张密. 大型光伏电站谐振现象分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 8-14.
- ZHOU Lin, ZHANG Mi. Analysis of resonance phenomenon in large-scale photovoltaic power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 8-14.
- [20] 冯玉. 三相光伏并网系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- FENG Yu. Research of three-phase photovoltaic grid-connected system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [21] 邵宜祥, 陈宁, 朱凌志, 等. 基于降阶雅可比矩阵的并网风电场局部静态电压支撑能力评估[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 14-19.
- SHAO Yixiang, CHEN Ning, ZHU Lingzhi, et al. Reduced jacobian matrix based method to assess local static reactive power/voltage supporting ability of interconnected wind farm [J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 14-19.
- [22] 刘兴高, 胡云卿, 林芯羽, 等. 最优化算法应用分析[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 18-21.

作者简介:



周林

周林(1961—),男,四川内江人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为微网及可再生能源发电理论及应用;

邵念彬(1990—),男,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向为光伏并网发电技术 (E-mail: 13618273070@163.com)。

(下转第128页 continued on page 128)

- [16] 黄涛,陆于平. 投撬棒后双馈风机暂态电势的变化特性分析[J]. 电网技术,2014,38(10):2759-2765.
HUANG Tao,LU Yuping. Analysis on transient EMF variation characteristic of doubly fed induction generator after crowbar protection activated[J]. Power System Technology,2014,38(10): 2759-2765.
- [17] HOWARD D F,HABETLER T G,HARLEY R G. Improved sequence network model of wind turbine generators for short-circuit studies[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2012,27 (4):968-977.

作者简介:



黄涛

黄涛(1988—),男,湖南新化人,博士研究生,从事风力发电保护与控制、电力系统数字保护方面的研究(E-mail:taoh545@126.com);

陆于平(1962—),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,从事电力系统数字保护、智能电网分布式发电保护与控制方面的研究。

Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm

HUANG Tao,LU Yuping,LING Qicheng,CHEN Yuwei

(School of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: The operating characteristics of FSCPS(Fault-Sequence Component Phase Selector) used in DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) -based wind farm are analyzed,which points out that there is a large difference between the positive and negative sequence equivalent impedances in the fault network of wind farm due to the special transient property of DFIG,deteriorating the operating characteristics of FSCPS. An improved FSCPS method based on fault-sequence voltage compensation is proposed,which detects the difference between the positive and negative sequence impedances of DFIG-based wind farm in real time and revises the result of phase selection adaptively. The operating characteristics of traditional FSCPS are improved and the validity of the proposed scheme is verified by the simulative results.

Key words: DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) -based wind farm; fault sequence components phase selector; positive and negative sequence equivalent impedances; fault sequence voltage compensation; wind power

(上接第122页 continued from page 122)

Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic plants

ZHOU Lin,SHAO Nianbin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University,Chongqing 400030,China)

Abstract: The active-power output fluctuation of large-scale grid-connected photovoltaic plant causes not only the PCC voltage violation but also the higher internal voltage,resulting in the protective action to trip off the inverters. The factors influencing the PCC voltage and the grid-connecting voltage of photovoltaic unit are analyzed and a strategy of reactive-power and voltage control considering the in-station voltage distribution is proposed. It detects the PCC voltage in real time,compares it with the reference,adopts a PI controller to automatically obtain the reactive-power needed for maintaining the PCC voltage,and realizes the dynamic adjustment of PCC voltage;it also regulates the reactive-power output of inverters in real-time to realize the uniform distribution of in-station voltage. The sensitivity analysis is applied to indicate the relationship between reactive-power and voltage,the design of PI controller parameters is given,and the reactive-power optimization with the uniform distribution of in-station voltage as its objective is converted to a nonlinear programming model with constraints,which can be quickly and accurately solved to obtain the reactive-power references for the reactive-power compensation devices and photovoltaic units. The in-station voltage distribution is improved to ensure the stable operation of photovoltaic power station while the stability of PCC voltage is guaranteed. The correctness and feasibility of the proposed control strategy are verified by the simulative results.

Key words: photovoltaic; electric power generation; large-scale grid-connected photovoltaic plant; voltage fluctuation; reactive-power control; voltage control; sensitivity; voltage distribution