

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.04.002

基于自适应下垂控制的风电场无功电压控制策略

Reactive power and voltage control strategy based on adaptive droop control for wind power plants

王康平¹,张兴科¹,刘财华²,沈希澄³,周霞^{3*}

WANG Kangping¹,ZHANG Xingke¹,LIU Caihua²,SHEN Xicheng³,ZHOU Xia^{3*}

(1.国家电网有限公司西北分部,西安710048;2.国电南瑞科技股份有限公司,南京211106;3.南京邮电大学先进技术研究院,南京210023)

(1.Northwest Branch of State Grid Corporation of China,Xi'an 710048,China;2.NARI Technology Development Company Limited,Nanjing 211106,China;3.Institute of Advanced Technology,Nanjing University of Posts and Telecommunications,Nanjing 210023,China)

摘要:大规模风电场并网会对电网的稳定性产生负面影响,主要体现在电压、频率和次同步等方面。当系统无功功率不足时,仅靠风电机组自身的无功调节无法提供足够的无功支撑。对此提出一种风电场无功电压控制策略,变流器采用自适应下垂控制,按照各机组自身容量调整无功输出以支持并网点电压。具体策略为:通常情况下使用最大功率点跟踪(MPPT)控制,以实现有功功率输出的最大化;当并网点发生电压越限时,采用有功功率削减控制,实时计算风电机组的有功功率削减优先级,对高优先级风电机组的有功功率进行定量削减,以满足系统的无功需求。最后利用PSCAD/EMTDC平台进行验证,结果表明该控制策略能够有效控制并网点电压,防止电压越限。

关键词:风电场无功电压;电压越限;最大功率跟踪控制;有功功率削减控制;自适应下垂控制

中图分类号:TK 01:TM 614 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2022)04-0012-08

Abstract: The grid connecting of large-scale wind farms would exert negative impacts on the security and stability of power system, mainly in terms of voltage, frequency and sub-synchronization resonance. When the system reactive power is insufficient, the wind turbine itself cannot provide enough reactive power support. Therefore, a reactive power and voltage control strategy is proposed in which converters of wind turbines adopt adaptive droop control and adjust their reactive power outputs according to their own capacities in order to support the voltage at grid connection point. To be specific, the strategy adopts maximum power point tracking (MPPT) control mode under normal circumstances to maximize the active power output. In the event of voltage over-limit at grid connection point, the converters adopt active power curtailment and the active power curtailment priority of different wind turbine is calculated in real time. The active power of the wind turbines with high priority would be adjusted at first, to meet the reactive power requirement of the system. The PSCAD/EMTDC simulation results show that the proposed strategy is effective in controlling the voltage at grid connection point and preventing voltage over-limit.

Keywords: reactive power and voltage of wind farm; voltage over-limit; MPPT; active power curtailment and control; adaptive droop control

0 引言

风力发电作为一种可再生能源发电技术,已经被广泛应用于电力系统中,然而风电大规模并网往往会对系统的稳定运行造成影响^[1-2]。国内风电场一般位于偏远地区,所连接的电网稳定性相对薄

弱,当风电场输出功率发生较大变化时,会使并网点电压稳定性明显降低,进而影响电力系统的安全稳定。

我国发生的多起风电机组连锁脱网事故,都与风电场无功功率和电压控制有密切的关系^[3-6]。目前国内外针对风电场无功功率补偿和并网点电压控制方法的研究,主要从2个方面进行:(1)在系统中配置无功补偿设备以保障风电场的电压稳

定^[7-10]; (2) 从风电场自身出发, 设计风电场无功控制策略^[11-13]。

永磁直驱式风电机组与双馈式风电机组都具有一定的无功调节能力, 当电网跌落较小时, 依靠风电机组自身的无功补偿可以满足要求。当电网电压跌落较大时, 需要在风电场装设无功补偿装置来实现无功控制^[14-16]。

文献[17]分析了不同风电机组的无功电压特性, 得出永磁直驱式风电机组对比鼠笼式异步机组、双馈式机组具有更好的无功电压特性。当系统电压降低时, 永磁直驱式风电机组的网侧变流器对有功功率、无功功率解耦控制, 通过调节能够快速向电网提供一定无功支撑^[18-19]。然而目前风电机组电压控制策略普遍采用固定下垂增益, 无法根据各风电机组的无功容量进行合理分配。文献[20]提出了适用于永磁直驱式风电机组的自适应下垂控制策略, 充分利用风电机组变流器的无功补偿, 以提高对并网点电压支持能力。

以上研究均存在不足, 在对风电场进行下垂控制时没有合理分配每个机组的无功功率。风电机组有功功率削减策略相关研究中, 未对削减量与削减顺序进行优化分配。

针对以上研究中的不足, 本文提出了基于自适应下垂控制的风电场无功电压控制策略。将风电机组变流器设计为 2 种工作模式: 最大功率点跟踪模式和有功功率削减模式。当并网点电压正常, 变流器采用最大功率点跟踪(MPPT)控制模式, 以实现最大风能捕获; 当并网点电压越限且变流器无功容量不足时, 转入有功功率削减控制模式, 计算各风电机组的有功功率削减优先级, 对高优先级风电机组的有功功率输出进行定量削减, 以满足系统的无功需求。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台建立模型, 并通过与传统方法进行对比, 证明了本文策略的可行性。

1 风电机组运行特性分析

以永磁直驱风电机组为例, 其基本组成包括风力机、永磁同步电机、全功率变流器和控制系统, 结构如图 1 所示。

风力机将风能转变为机械能的方程为

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta), \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_w}, \quad (2)$$

式中: P_t 为风力机的输出功率; ρ 为空气密度; R 为风轮半径; v_w 为当前风速; C_p 为风能利用系数; λ 为叶尖

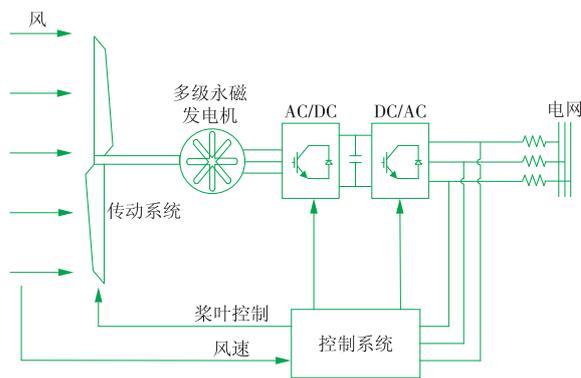


图 1 直驱风电机组结构

Fig. 1 Structure of the PMSG

速比; β 为桨距角; ω 为风力机转速。

当桨距角一定时, 可通过调节叶尖速比使风能利用系数达到最大值, 如图 2 所示, 图中 v_1, v_2, v_3, v_4 为风速, P_{opt} 为最佳功率。风电机组运行过程中, 通过控制风力机转速, 使其保持当前风速所对应的最佳转速, 即可得到最大风能利用率。

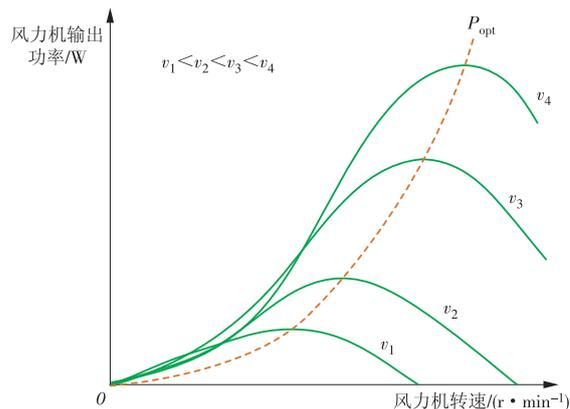


图 2 风力机输出功率与风力机转速的关系曲线

Fig. 2 Relationship between the power output and speed of the wind turbine

风电机组输出无功功率由变流器有功功率与视在功率决定, 为

$$Q_w = \sqrt{S_w^2 - P_t^2}, \quad (3)$$

式中: S_w 为风电机组变流器视在功率。

在极端条件下, 风电机组输出功率已达到额定功率且无功功率缺额较大, 可根据有功功率与无功功率的关系, 通过减载运行来增加风电机组的无功功率裕度。

不同风速下, 风电机组输出有功功率、无功功率的范围如图 3 所示。

当风速较大时, 风电机组输出的无功功率较小, 可以通过削减有功功率来提高无功功率裕度。当输入风速大于等于额定风速时, 若不进行有功功率削减, 则几乎没有无功调节能力。

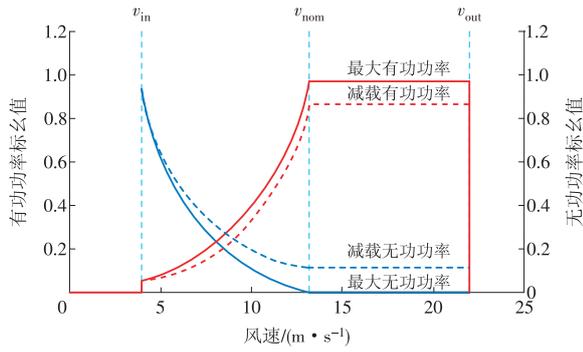


图 3 风电机组有功功率、无功功率范围

Fig. 3 Active and reactive power ranges of the PMSG

2 自适应下垂无功电压控制策略

2.1 控制流程

本文提出了基于自适应下垂控制的风电场无功电压控制策略包含 MPPT 控制和有功功率削减控制 2 种模式。具体的控制流程如图 4 所示。

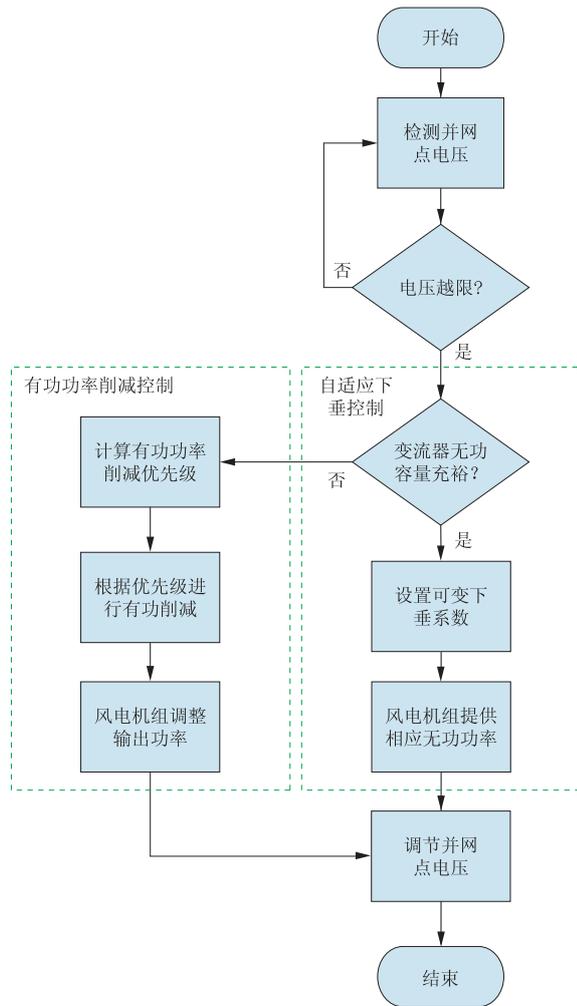


图 4 风电场自适应无功电压控制流程

Fig. 4 Process of WPP reactive power and voltage adaptive control

风电机组变流器采用自适应下垂控制,输出无功功率以支撑并网点电压。机组通常情况工作在

MPPT 模式下,以实现最大风能捕获。当并网点电压越限且变流器无功容量不足时,转入有功功率削减模式,根据有功功率削减算法,计算有功功率削减优先级,定量削减各风电机组的有功功率输出,提供无功支撑以解决电压越限问题。

2.2 MPPT 控制

通常情况下,系统正常运行且并网点电压稳定,为使风电机组输出最大功率,采用 MPPT 控制模式。当风速位于切入风速与额定风速之间,为使风能利用系数 C_p 达到最大值,需要根据当前风速调整风力机转速。当风速位于最大风能跟踪区时,风力机桨距角 β 维持 0° ,由式(2)可知,风能利用系数 C_p 由叶尖速比 λ 决定。

当风力机叶尖速比为 λ_{opt} 时,即可使风能利用系数保持最大值,如图 5 所示。每一风速下都有与之对应的最佳转速,为使用风能利用系数最大,只需控制风力机转速跟踪最优转速即可实现最大功率跟踪控制。

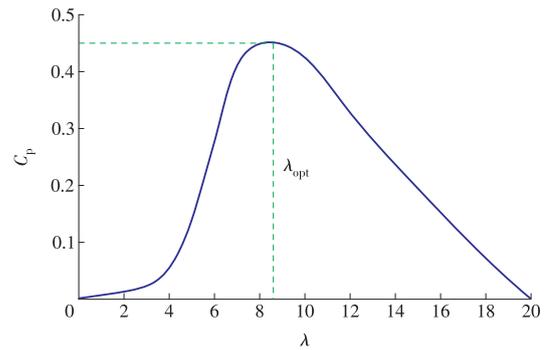


图 5 风能利用系数与叶尖速比关系曲线

Fig. 5 Relationship between power coefficient and the tip speed ratio of the wind turbine

2.3 自适应下垂控制

受风速波动、风向等因素影响,风电场内的风电机组具有不同的输入风速,导致每个机组的无功容量不同,为确保风电场的安全稳定运行,网侧变流器可采用自适应下垂控制,如图 6 所示。

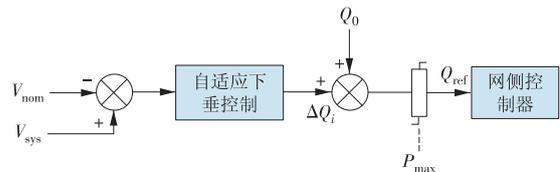


图 6 自适应下垂控制

Fig. 6 Adaptive droop control

下垂控制回路的输出 ΔQ_i 可定义为

$$\Delta Q_i = -AG_i(v_i)(V_{sys} - V_{nom}), \quad (4)$$

式中: V_{sys} 为有效电压; V_{nom} 为额定电压; $AG_i(v_i)$ 为自适应下垂系数。自适应下垂系数与风电机组的无

功率成正比,为

$$AG_i(v_i) = \frac{\alpha Q_i^t}{\sum_{i=1}^n Q_i^t}, \quad (5)$$

式中: Q_i^t 为*i*号风电机组*t*时刻的无功功率; α 为最大下垂系数,根据无功需求进行整定。

由式(5)可知,自适应下垂系数是关于空间和时间的变量,原因在于风电场的集群效应使得不同风电机组具有不同的无功容量。

为提高电压支撑能力,对无功容量较多的风电机组设置较大的下垂系数,对无功容量较少的机组设置较小的下垂系数,当输入风速大于额定风速时,下垂系数设为0。

风电机组的输入风速也会随时间变化,下垂系数可以随风速的变化进行自适应调整,有助于系统稳定运行。

此外,由于下垂系数可跟随增大的无功容量自适应增加,避免了风电机组频繁达到最大无功功率限制,有助于减少变流器的磨损。

2.4 有功功率削减控制

当并网点出现较为严重的电压越限时,可对部分风电机组进行有功功率削减控制,使其释放出更多的无功容量,以解决自适应下垂控制输出的无功功率无法满足系统的无功需求的问题。

风电机组无功功率与有功功率关系如图7所示,风电机组初始运行在*a*点,此时有功功率为 P_1 ,无功功率为0。如果发生干扰,导致电压越限,相应的无功功率将被提供或吸收,工作状态从*a*点变化到*b*(b_1)点。在*b*(b_1)点可以被提供或吸收的最大无功功率为 Q_1 。若无功缺额仍然存在,则进行有功功率削减控制,工作状态从*b*(b_1)点变到*c*,*d*(c_1 , d_1)点。

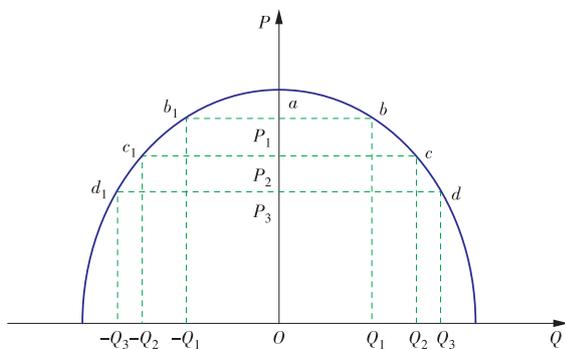


图7 风电机组无功功率与有功功率的关系

Fig. 7 Relationship between active and reactive power of the PMSG

当进行有功功率削减控制后,风电机组无功容量的增加值为

$$\Delta Q = \sqrt{S^2 - (P_1 - \Delta P)^2} - \sqrt{S^2 - P_1^2}. \quad (6)$$

通过以上理论分析可知,不同工作状态下的风电机组在削减相同量的有功功率后,无功功率的增加量有差异。因此实际运行中,在进行有功功率削减控制时,需要判别各个机组的有功功率削减优先级。将削减等额有功功率后能获得最大无功功率增量的机组作为优先削减机组,从而在提供无功容量时减少总体有功功率削减量。

$$\Delta Q = \sqrt{S^2 - (P_i^t - \Delta P)^2} - \sqrt{S^2 - (P_i^t)^2}, \quad (7)$$

$$\max_{i=1}^n \Delta Q_i = \Delta Q_k, \quad (8)$$

式中: S 为风电机组的额定功率; P_i^t 为*t*时刻风电机组*i*的有功功率输出; ΔP 为有功功率削减量; ΔQ_i 为风电机组*i*的无功功率增量; k 为优先削减的风电机组编号。

当并网点电压控制在正常范围后,为提高风电场的消纳能力,需要进行有功功率的恢复。

$$\Delta Q_i = \sqrt{S^2 - (P_i^t)^2} - \sqrt{S^2 - (P_i^t + \Delta P)^2}, \quad (9)$$

$$\min_{i=1}^n \Delta Q_i = \Delta Q_m, \quad (10)$$

式中: ΔP 为有功功率的恢复量; ΔQ_i 为风电机组*i*的有功功率恢复后的无功功率减少量; m 为优先恢复的风电机组编号。

3 控制器设计

永磁直驱式风电机组采用背靠背双脉冲宽度调制(PWM)变流器结构,由网侧变流器与机侧变流器组成。

网侧变流器对网侧*dq*轴电流进行调节,以控制直流侧电压,同时对输出有功功率、无功功率进行解耦控制;机侧变流器能调节风电机转速,实现最大风能捕获的功能。

机侧变流器采用零*d*轴电流控制,令直轴定子电流 $i_{ds}=0$,当直轴电感 L_d 与交轴电感 L_q 相等时,发电机电磁转矩 T_e 与交轴电流 i_{qs} 成线性关系。需要进行转速控制时,可通过交轴电流进而改变电磁转矩,以控制转速。

网侧变流器使用电压定向控制策略,根据变流器功率解耦控制原理,变流器输出功率可表示为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2} (u_d i_q - u_q i_d) \end{cases}. \quad (11)$$

将电网电压矢量定向在*dq*坐标系的*d*轴上,*q*轴电压 u_q 等于0。由此计算出系统有功功率、无功功率表达式为

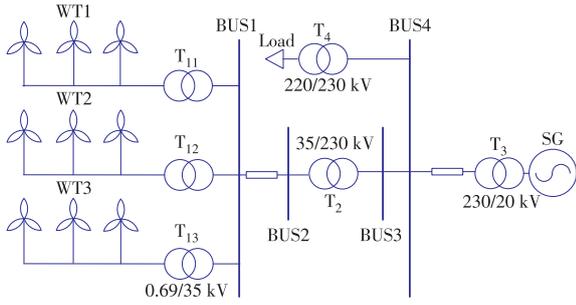


图 9 风电场并网模型

Fig. 9 WPP integration model

4.1 自适应下垂控制

为比较不同控制策略的效果,比较自适应下垂控制、固定下垂控制和无控制 3 种情况下的无功功率与电压有效值。

受不同风速影响,各风电机组有功功率输出分别为 1.41, 1.09, 0.84 MW, 5~15 s 之间在并网点加入 1.2 MV·A 的感性无功负载,此时系统无功功率不足,并网点电压下降。固定下垂控制和自适应下垂控制下每个风电机组的无功功率输出如图 10—11 所示。

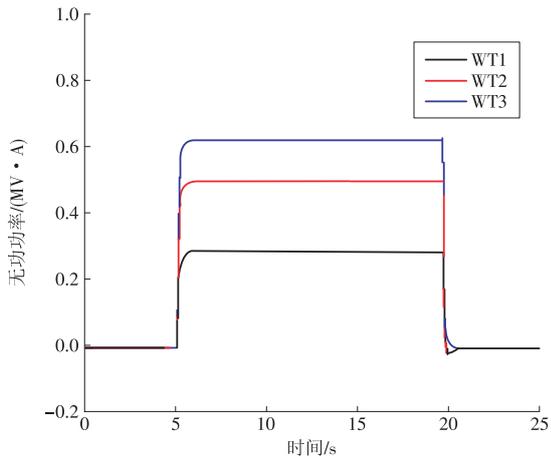


图 10 固定下垂控制下风电机组的无功功率

Fig. 10 Reactive power output of the WPP in constant droop control

自适应下垂控制模式下,变流器可根据各个风电机组的无功容量对其无功功率输出量进行调整,从而为并网点提供更多的无功支撑。而在固定下垂控制中,风电机组的无功功率输出量受下垂系数的限制,导致其无功功率输出无法满足并网点无功需求。

由图 10—12 对比可知,风电机组在自适应下垂控制下相比固定下垂控制输出更多无功功率,同时并网点电压标幺值在自适应下垂控制下为 0.953,相比固定下垂控制的电压标幺值 0.945 有所提升,证明自适应下垂控制拥有较好的电压控制能力。

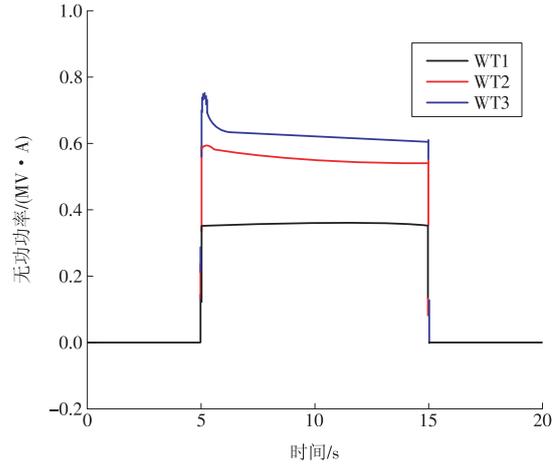


图 11 自适应下垂控制下风电机组的无功功率

Fig. 11 Reactive power output of the WPP in adaptive droop control

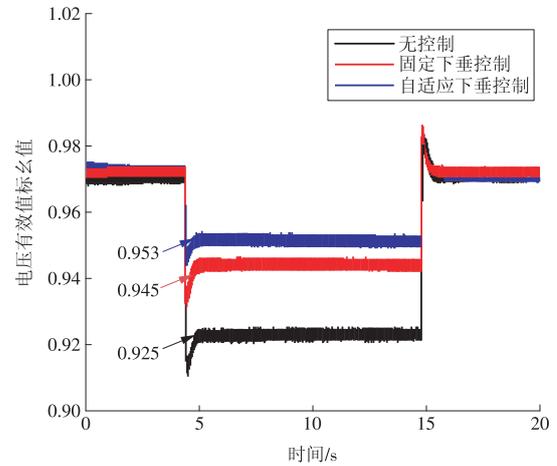


图 12 不同控制策略下的并网点电压

Fig. 12 Voltage at grid connection point under different control strategies

4.2 有功功率削减控制

图 13—15 为有功功率削减控制策略下各风电机组输出的有功功率、无功功率以及并网点电压水平。3 台风电机组分别输出 1.42, 1.15, 0.84 MW 有功功率。5~15 s 之间在并网点加入 1.2 MV·A 的感性无功负荷,导致系统无功容量不足,并网点电压下降。

尽管在运行过程中,始终保持自适应下垂控制,各风电机组根据自身容量向系统输出无功功率。但由于无功缺额较大,并网点电压标幺值依然越限(0.943)。此时采用有功功率削减控制:首先利用算法实时判别各机组削减优先级,之后对部分优先级较高的风电机组进行定量削减,在 10 s 时对风电机组进行有功功率削减。经过有功功率削减后,风电场电压标幺值恢复到 0.952,处于正常范围内。由此可见,有功功率削减控制能够有效处理并网点电压越限问题。

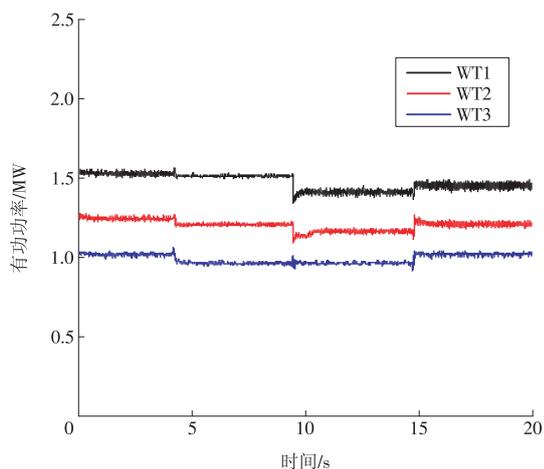


图 13 有功功率削减控制下风电机组的有功功率

Fig. 13 Active power output of the WPP in active power curtailment control

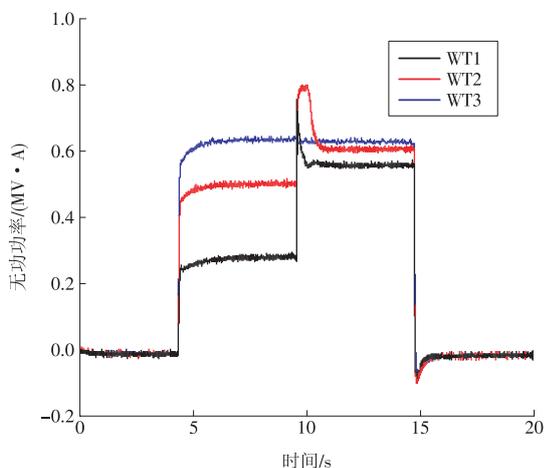


图 14 有功功率削减控制下风电机组的无功功率

Fig. 14 Reactive power of the WPP with the active power curtailment

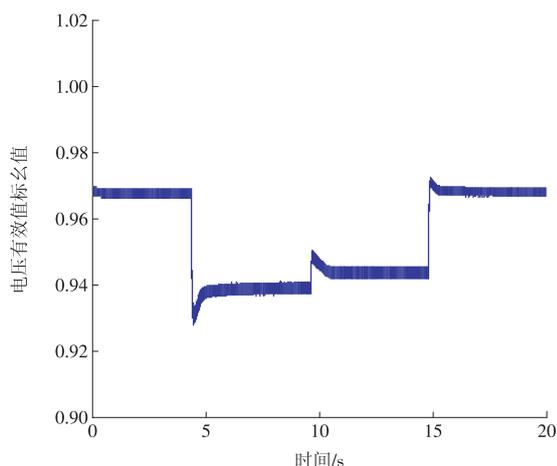


图 15 有功功率削减控制下的并网点电压

Fig. 15 Voltage at grid connection point with the active power curtailment

5 结论

本文针对风电场并网点无功电压问题,分析了

自适应下垂控制与有功功率削减控制在无功电压控制中的作用,提出了基于自适应下垂控制的无功电压控制策略,得出以下结论。

(1)在风电机组网侧变流器采用自适应下垂控制策略,相比固定下垂系数控制,可在不同情况下根据风电场内各机组的运行状态,自动调节下垂系数,合理分配各机组的无功功率输出量,对系统提供无功支持,以提升系统运行稳定性。

(2)并网点电压越限时,根据削减优先级判别算法,对优先级较高的部分风电机组输出的有功功率进行定量削减,变流器能够产生更多无功功率来支持并网点电压,有效解决并网点电压越限问题。

参考文献:

- [1]张哲,王成福,董晓明,等.基于分层模型预测控制的风电场电压协调控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(11):34-42,94.
ZHANG Zhe, WANG Chengfu, DONG Xiaoming, et al. Coordinated voltage control strategy of wind farms based on hierarchical model predictive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 34-42, 94.
- [2]蔡游明,李征,蔡旭.以并网点电压和机端电压平稳性为目标的风电场无功电压协调控制[J].电力自动化设备,2018,38(8):166-173.
CAI Youming, LI Zheng, CAI Xu. Coordinated control of reactive power and voltage for wind farm aiming at voltage stability of PCC and generator terminal [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 38(8): 166-173.
- [3]王伟,徐殿国,王琦,等.大规模并网风电场的无功电压紧急控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(22):8-14.
WANG Wei, XU Dianguo, WANG Qi, et al. Reactive voltage emergency control strategy for large - scale wind farm integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 8-14.
- [4]孙华东,张振宇,林伟芳,等.2011年西北电网风机脱网事故分析及启示[J].电网技术,2012,36(10):76-80.
SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis on serious wind turbine generators tripping accident in northwest china power grid in 2011 and its lessons [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80.
- [5]周鹏,张新燕,邸强,等.基于虚拟同步机控制的双馈风电机组预同步并网策略[J].电力系统自动化,2020,44(14):71-78.
ZHOU Peng, ZHANG Xinyan, DI Qiang, et al. Pre - synchronous grid - connection strategy of DFIG - based wind turbine with virtual synchronous generator control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (14) : 71-78.

- [6] 牟澎涛,赵冬梅,王嘉成.大规模风电接入对系统功角稳定影响的机理分析[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1325-1334.
MU Pengtao, ZHAO Dongmei, WANG Jiacheng. Influence mechanism analysis of large-scale wind power integration on power system angle stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5):1325-1334.
- [7] 刘宇明,黄碧月,孙海顺,等.SVG与直驱风机间的次同步相互作用特性分析[J].电网技术,2019,43(6):2072-2079.
LIU Yuming, HUANG Biyue, SUN Haishun, et al. Study on subsynchronous interaction between DP-MSG-based wind turbines and SVG [J]. Power System Technology, 2019, 43(6):2072-2079.
- [8] NARIMANI M, VARMA R K. Application of static var compensator(SVC) with fuzzy controller for grid integration of wind farm[C]//23rd CCECE. Calgary, Canada, 2010.
- [9] 张晓朝,段建东,石祥宇,等.利用DFIG无功能力的分散式风电并网有功最大控制策略研究[J].中国电机工程学报,2017,37(7):2001-2009.
ZHANG Xiaozhao, DUAN Jiandong, SHI Xiangyu, et al. Research of maximum control strategy with dispersed wind power considering reactive capability of DFIG [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7):2001-2009.
- [10] 张琛,蔡旭,李征.全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4018-4026, 4280.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with full-scale voltage source converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14):4018-4026, 4280.
- [11] 刘璐,耿华,马少康,等.低电压穿越过程中DFIG型风电场同步稳定及无功电流控制方法[J].中国电机工程学报,2017,37(15):4399-4407, 4580.
LIU Lu, GENG Hua, MA Shaokang, et al. Synchronization stability and reactive current control method of DFIG wind farm during low voltage ride through [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15):4399-4407, 4580.
- [12] 吴杰,师庆丹,李珊,等.考虑电缆选型双馈机组分散协调控制对风电场无功优化影响[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):113-119.
WU Jie, SHI Qingdan, LI Shan, et al. The influence of decentralized and coordinated control of DFIG on reactive power optimization for wind farm considering cable selection [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):113-119.
- [13] 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. Design and application of automatic voltage control system in doubly-fed induction generator wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5):15-22.
- [14] 颜湘武,李君岩,魏星.直驱永磁同步风电机组在全风速范围内的控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(23):138-144.
YAN Xiangwu, LI Junyan, WEI Xing. Research on control strategy of direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine in full wind speed range [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23):138-144.
- [15] GUO Q, SUN H, WANG B, et al. Hierarchical automatic voltage control for integration of large-scale wind power: Design and implementation [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 120:234-241.
- [16] KHEZRI R, BEVRANI H. Voltage performance enhancement of DFIG-based wind farms integrated in large-scale power systems: Coordinated AVR and PSS [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73(11):400-410.
- [17] 曹娜,李岩春,赵海翔,等.不同风电机组对电网暂态稳定性的影响[J].电网技术,2007,31(9):53-57.
CAO Na, LI Yanchun, ZHAO Haixiang, et al. Comparison of effect of different wind turbines on power grid transient stability [J]. Power System Technology, 2007, 31(9):53-57.
- [18] 王永强,喻俊志,冯静安,等.永磁直驱风电机组低/高电压穿越研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(9):34-42.
WANG Yongqiang, YU Junzhi, FENG Jing'an, et al. Research on low/high voltage ride through of permanent magnet synchronous wind turbine [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9):34-42.
- [19] 陈惠粉,乔颖,闵勇,等.风电场动静态无功补偿协调控制策略[J].电网技术,2013,37(1):248-254.
CHEN Huifen, QIAO Ying, MIN Yong, et al. Study on coordinated control strategy of dynamic and static reactive compensation in wind farm [J]. Power System Technology, 2013, 37(1):248-254.
- [20] DAI J, TANG Y, YI J. Adaptive gains control scheme for PMSG - Based wind power plant to provide voltage regulation service [J]. Energies, 2019, 12(4):753.

(本文责编:张帆)

作者简介:

王康平(1980),男,高级工程师,硕士,从事电力系统稳定方面的研究工作, wkpnpwn@163.com;

张兴科(1988),男,工程师,硕士,从事电力系统稳定方面的研究工作, xkzhang757@126.com;

刘财华(1986),男,高级工程师,从事电力工程方面的研究工作, 362241852@qq.com;

沈希澄(1997),男,在读硕士研究生,从事电力系统稳定方面的研究工作, 755504680@qq.com;

周霞*(1978),女,高级工程师,博士,从事电力系统分析与控制方面的研究工作, zhouxia@njupt.edu.cn.

*为通信作者。