

基于负荷安全域的双馈风电场 无功配置及规划

卢家麟¹, 竺炜¹, 唐颖杰², 马俊杰², 宁星¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410076; 2. 国网青海省电力公司西宁供电公司, 青海西宁 810000)

摘要:为了应对风电接入电网引起的电压安全稳定问题,提高风电场并网点电压稳定性,从规划角度考虑,提出一种基于负荷安全域计算双馈风电场无功配置以及场内集电线路选型的方法。首先研究推导风电机组机端 $P-Q$ 特性曲线,得到双馈风电机组稳定运行域。接着分析了机组 $P-Q$ 特性曲线和集电线路首端安全域边界配合问题,以此确定集电线路型号,达到充分利用风电机组无功能力目的。最后通过并网点的安全域边界计算风电场无功配置容量。算例结果表明,所提出的无功配置方法能保证并网点电压在安全范围内。

关键词:双馈风电机组;负荷安全域;集电线路;电压安全;无功容量

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.010 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2020)01-0083-07

Reactive power configuration and planning of doubly-fed wind farm based on load security domain

LU Jialin¹, ZHU Wei¹, TANG Yinjie², NING Xing¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company Xining Power Supply Company, Xining 810000, China)

Abstract: The problem of voltage safety and stability might occur when the wind power is connected to the power grid. In order to improve the voltage stability of the wind farm's grid connection point, this paper proposes a reactive configuration of the doubly-fed wind farms on the basis of the calculation of load's safe domain. In addition, a collector line selection method is also proposed. Firstly, the $P-Q$ characteristic curve of the wind turbine unit is derived, and the stable operation domain of the doubly-fed wind turbine is obtained. Then, the $P-Q$ characteristic curve and the boundary coordination problem of the safety end of collector line are analyzed to determine the collector line type, so as to fully utilize the non-functionality of the wind turbine. Finally, the reactive power allocation capacity of the wind farm is calculated through the security domain boundary of the grid connection point. The results of the example show that the proposed reactive power configuration method can ensure the grid voltage within the safe range.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); load security domain; collector line; voltage security; compensation capacity

近年来,中国的风力发电容量逐年增加,风能利用得到很大的发展。但风电场一般地处偏远地区,其输电线路比较长,所接入的电网系统的网架结构薄弱^[1-2]。风电出力由于存在随机性和波动性,导致风电场电压容易波动,对电网电压造成很大影响,严重时会产生电压越限问题^[3]。

针对风电场并网点电压偏低问题,风电场多采用双馈风电机组(DFIG)和无功补偿设备协调配合的方法来维持并网点电压水平^[4-6]。双馈风电机组能输出无功功率,但其并不能满足风电场调压要求。风电场所配置的无功容量按照风电场总装机容量的百分比来确定,却未考虑线路和变压器损耗,其结果可能导致所配置的无功容量偏小,仍无法满足并网点电压要求^[7]。文献[8-9]根据风电场并网点处的无功/电压灵敏度来配置不同风速下的无功补偿量的大小,并对无功补偿设备进行预先投切优化。但因风电的波动性,根据并网点无功/电压灵敏度计算无功配置容量可能很难适应风电出力的变化,这就导致计算风电场配置的无功补偿容量不准确^[10]。

同时,研究发现,线路首、末端传输功率与线路压降有严格的对应关系,若线路的首、末端功率过大,会造成线路压降偏大,使其线路两端的电压偏低^[11-12]。在风电场中,集电线路首、末端功率也必须严格满足相关对应关系,保证压降不超过允许值。而目前有关风电场无功补偿的研究也未曾考虑与集电线路压降的关系,尤其是双馈风电机组的出口功率是否满足集电线路的功率—压降关系并未有过多的研究。

综上所述,针对风电场并网点电压容易偏低的情况,该文从风电场规划和充分利用双馈风电机组的无功能力的角度出发,提出一种基于线路负荷安全域理论的风电场内部集电线路规划方法,以及实际所需配置的无功容量计算方法。

1 双馈风电机组无功输出能力

1.1 双馈风电机组无功调节原理

双馈风电机组的稳态等值电路,如图1所示,可得电压和电流关系:

$$\begin{cases} E = jI_m X_m \\ U_s = E - (R_s + jX_s) \cdot I_s \\ U'_r = E + (R'_r + jX_r) \cdot I'_r \\ I_m = I'_r - I_s \end{cases} \quad (1)$$

式中 E 、 U_s 、 U'_r 分别表示双馈风电机组励磁电动势、定子电压和折算到定子侧的转子电压; I_m 、 I_s 、 I'_r 分别表示双馈风电机组励磁电流、定子电流和折算到定子侧的转子电流。

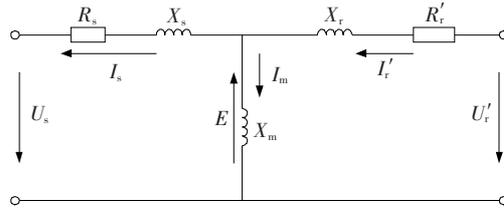


图1 双馈风电机组等效电路

Figure 1 Equivalent circuit of doubly-fed wind turbine

双馈风电机组采用定子磁场矢量控制策略,有 $\psi_{sd} = \psi_s$, $\psi_{sq} = 0$, 则在同步旋转坐标系下,定子侧输出功率:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} U_s I_{qs} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_s X_m I_{qr}}{X_s} \\ Q_s = -\frac{3}{2} U_s I_{ds} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U_s^2 - U_s X_m I_{dr}}{X_s} \end{cases} \quad (2)$$

式中 U_s 表示定子电压; I_{qs} 、 I_{ds} 分别表示定子电流的交、直轴分量; I_{qr} 、 I_{dr} 分别表示转子电流的交、直轴分量; X_m 、 X_s 分别表示励磁电抗、定子电抗。由式(2)可知,通过控制转子电流的交、直轴分量能分别控制双馈风电机组定子侧的有功和无功功率的输出。

1.2 双馈风电机组最大无功功率输出能力

双馈风电机组最大优点是能解耦控制无功功率输出,因此有必要分析其最大无功输出能力。影响双馈风电机组无功输出的因素主要有定子绕组最大电流、转子绕组最大电流和机组功率因数,其中最主要的影响因素是转子最大电流^[13-14]。

受转子最大电流的约束,双馈风电机组定子侧发出和吸收的无功功率:

$$\begin{cases} Q_{smax} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3L_m}{2L_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \\ Q_{smin} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3L_m}{2L_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (3)$$

网侧换流器也可以输出无功功率,其最大无功容量:

$$\begin{cases} Q_{cmax} = \sqrt{S_{cmax}^2 - (sP_s)^2} \\ Q_{cmin} = -\sqrt{S_{cmax}^2 - (sP_s)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)中 Q_{smax} 、 Q_{cmax} 与 Q_{smin} 、 Q_{cmin} 分别表示

双馈风电机组定子侧、网侧换流器发出的无功功率最大值与最小值; s 是转差率, S_{cmax} 是网侧换流器最大容量; I_{rmax} 是转子侧换流器输出的最大转子电流。

因此,一台双馈风电机组无功功率输出能力如式(5),其 $P-Q-U$ 三维曲面如图 2 所示

$$\begin{cases} Q_{\text{gmax}} = Q_{\text{smax}} + Q_{\text{cmax}} \\ Q_{\text{gmin}} = Q_{\text{smin}} + Q_{\text{cmin}} \end{cases} \quad (5)$$

从图 2 可知,随着机端电压升高,双馈风电机组的无功输出能力增大。用一个电压水平面相切其三维曲面,可在 $P-Q$ 平面上得到 2 条双馈风机 $P-Q$ 包络线,2 条包络线围成的区域为双馈风机正常稳定运行的区域。

正常运行下,双馈风电机组常作为一个无功源向电网输出无功功率。因此,以下的所有分析只考虑双馈风电机组的上包络线,如图 3 所示。双馈风电机组可运行于图中阴影部分的任意一点。同时,可以看出,由于变流器容量限制,双馈风电机组随着输出的有功功率的增大,其输出无功功率反而减小,单靠双馈风电机组无法满足风电场并网电压要求,需加装无功补偿设备。

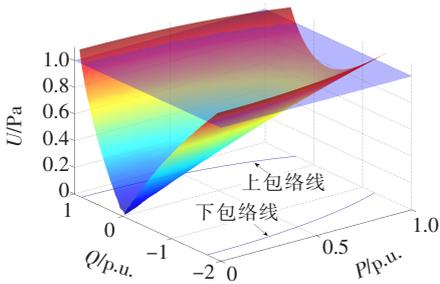


图 2 双馈风电机组机端 $P-Q-U$ 三维曲面关系
Figure 2 Three-dimensional surface relationship of $P-Q-U$ on the end of doubly-fed wind turbine

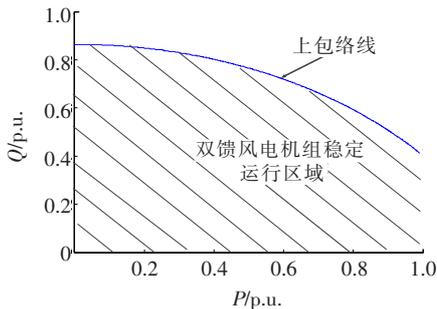


图 3 双馈风电机组机端输出稳定区域
Figure 3 Output stable area of doubly-fed wind turbine unit

2 双馈风电机组 $P-Q$ 上包络线与首端安全域边界的配合关系

2.1 线路负荷安全域

文献[11]通过线路功率方程推导出线路首、末端功率与电压的关系,即

首端:

$$\left(P_i - \frac{U_i^2 R}{|Z_L|^2} \right)^2 + \left(Q_i - \frac{U_i^2 X}{|Z_L|^2} \right)^2 = \left(\frac{U_i U_j}{|Z_L|} \right)^2 \quad (6)$$

末端:

$$\left(P_j + \frac{U_j^2 R}{|Z_L|^2} \right)^2 + \left(Q_j + \frac{U_j^2 X}{|Z_L|^2} \right)^2 = \left(\frac{U_i U_j}{|Z_L|} \right)^2 \quad (7)$$

若给定线路首、末端电压值 U_i, U_j ,可在 $P-Q$ 平面上的得到首、末端负荷安全域边界,如图 4 所示,并且在第一、第四象限且在末端负荷安全域边界以下部分,称之为末端负荷安全域,同理可得首端安全域。而且文献[11]还指出,若想控制线路首、末端电压在安全范围内,需要保证线路两端的功率在各自的安全域内。

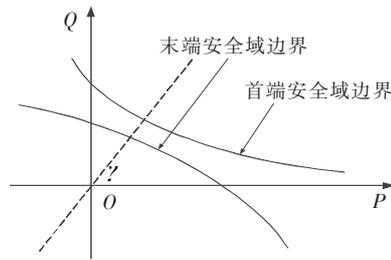


图 4 线路首、末端负荷安全域边界

Figure 4 Load safety domain boundary of the head and end of line

2.2 双馈风机 $P-Q$ 上包络线与首端安全域边界匹配

由图 3 双馈风电机组的 $P-Q$ 上包络线可知,风电机组虽然可提供一定的无功功率,但根据 2.1 节负荷安全域理论,机组并不一定都能在任何工况下满发出所有的无功功率,这其中需要考虑线路功率与压降的关系。

要想限制线路压降,保证两端电压在安全范围内,线路的传输功率必须满足在安全域内。在风电场内,集电线路首端功率等于双馈风电机组的总功率,这就表明,要想维持集电线路的电压良好,就必须保证双馈风电机组发出的功率在集电线路首端负

荷安全域内,也即双馈风电机组 $P-Q$ 上包络线与首端安全域边界的配合问题。

假设风电场由 30 台 1.5 MW 双馈风电机组组成,并等值成一台风电机组,集电线路长度为 20 km。如图 5 所示。

设定集电线路首、末端电压分别为 1.05 p. u. 和 0.97 p. u., 给定集电线路 2 种不同线型,得到 2 条首端安全域边界,如图 6 所示。

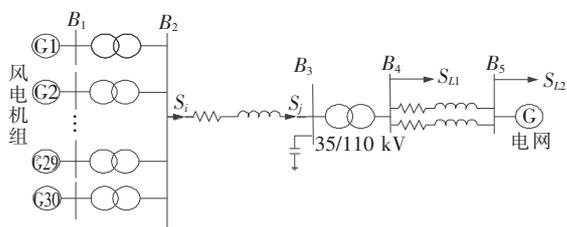


图 5 双馈风电场接入电网模型

Figure 5 Model of doubly-fed wind farm connected to power grid

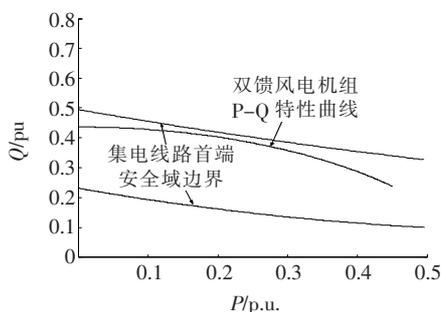


图 6 风电机组 $P-Q$ 上包络线与首端安全域边界的配合关系

Figure 6 Coordination relationship between $P-Q$ characteristic curve of wind turbine and boundary of load safety domain at the head end

1) 双馈风电机组 $P-Q$ 上包络线在首端安全域边界上方。

若风电场的风电机组 $P-Q$ 上包络线在首端安全域边界的上方,如图 6 所示。为了保证集电线路首端功率在其安全域边界内,满足线路压降特性,必须减少双馈风电机组输出的无功功率,此时风电机组无功输出能力不能得到充分的利用。

2) 双馈风电机组 $P-Q$ 上包络线在首端安全域边界下方。

若风电场的风电机组 $P-Q$ 上包络线在首端安全域边界的下方,如图 6 所示。明显可以看出,在这种情况下,双馈风电机组机端输出功率在集电线路

路首端安全域边界内,双馈风电机组的无功输出能力能得到充分利用。

因此,从充分利用双馈风电机组无功能力的角度考虑,风电机组 $P-Q$ 上包络线在集电线路首端安全域边界下方较好。

3 风电场集电线路选型

由该文第 2 节可知,在确定线路首、末端电压限值后,线路的负荷安全域大小仅与线路阻抗大小有关,即与线路型号及长度有关。而第 3 节指出,风电机组 $P-Q$ 上包络线必须在集电线路首端安全域边界下方,才能充分利用风电机组无功能力。

因此,若风电场的双馈风电机组型号已确定,则对应的机组 $P-Q$ 上包络线也已确定。则以风电机组 $P-Q$ 上包络线为依据,选择合适的集电线路的线路型号和电压等级,令风电机组与集电线路首端负荷安全域边界相互匹配,保证风电机组 $P-Q$ 上包络线必须在集电线路首端安全域边界下方。

一般希望风电场的风电机组尽可能满发,但风电场并网点的电压却是最低的,此时就要保证在风电机组满发时,能最大程度地利用风电机组的无功能力。因此,根据风电机组的 $P-Q$ 上包络线得到机组满发时的机组出口发出的有功功率 P_N 和能发出的无功功率 Q ,将其代入式(7),得到式(8)。选择合适的线路型号和电压等级满足式(8),即可令风电机组 $P-Q$ 上包络线在集电线路首端负荷安全域边界的下方。

$$\left(P_N - \frac{U_i^2 R}{|Z_L|^2} \right)^2 + \left(Q - \frac{U_i^2 X}{|Z_L|^2} \right)^2 \geq \left(\frac{U_i U_j}{|Z_L|} \right)^2 \quad (8)$$

4 风电场无功容量配置确定

从图 3 可知,仅靠机组本身的无功输出能力并不能满足并网电压要求,因此,如何规划风电场内部所需配置的无功容量就显得很重要。

通过图 4 可看出,当风电发出的有功较大,会使风电场集电线路末端功率点处于安全域的第四象限,这说明在传输较大的有功功率的同时要保证线路电压在正常水平内,限制线路压降,就必须在线路

的首、末端都注入无功功率。

风电场的无功补偿主要是满足风电送出电网所需的无功功率和当地的无功负荷,避免大量的无功功率从电网中获取。因此,以图 5 为例,基于负荷安全域理论,确定风电场无功配置容量,其步骤如下。

1) 根据风电场电压控制要求,确定风电场集电线路首端 B_2 的电压额定值 U_{2N} 、末端 B_3 的电压上限值 U_{3U} 和下限值 U_{3L} ,以及线路参数 Z_L 。将 U_{2N} 和 U_{3U} 以及线路参数 Z_L 代入式(7)得到风电场接入点负荷安全域上边界 L_{NU} ,将 U_{2N} 和 U_{3L} 以及线路参数 Z_L 代入式(7)得到风电场并网点负荷安全域下边界 L_{NL} ,从而得到风电场接入点的负荷安全域。

$$\left(P' + \frac{U_{3L}^2 R}{|Z_L|^2}\right)^2 + \left(Q' + \frac{U_{3L}^2 X}{|Z_L|^2}\right)^2 = \left(\frac{U_{2N} U_{3L}}{|Z_L|}\right)^2 \quad (9)$$

$$\left(P'' + \frac{U_{3U}^2 R}{|Z_L|^2}\right)^2 + \left(Q'' + \frac{U_{3U}^2 X}{|Z_L|^2}\right)^2 = \left(\frac{U_{2N} U_{3U}}{|Z_L|}\right)^2 \quad (10)$$

2) 采集风电场当地最大负荷 S_{L1} 。

3) 将风电场并网点最大有功功率 P_3 代入式(11)、(12),分别计算有功功率 P_3 在负荷安全域上、下边界所对应的无功功率 Q'_3 、 Q''_3 。

$$Q'_3 = \sqrt{c'^2 - (P_3 + a')^2} - b' \quad (11)$$

$$Q''_3 = \sqrt{c''^2 - (P_3 + a'')^2} - b'' \quad (12)$$

式中 $a' = \frac{U_{3L}^2 R}{|Z_L|^2}$, $b' = \frac{U_{3L}^2 X}{|Z_L|^2}$, $c' = \frac{U_{2N} U_{3L}}{|Z_L|}$; $a'' = \frac{U_{3U}^2 R}{|Z_L|^2}$, $b'' = \frac{U_{3U}^2 X}{|Z_L|^2}$, $c'' = \frac{U_{2N} U_{3U}}{|Z_L|}$ 。

4) 计算风电场无功配置容量范围,得到风电场所需配置无功补偿容量的最小值和最大值 $Q_{\min} = Q_{S_{L1}} - Q'_3$, $Q_{\max} = Q_{S_{L1}} - Q''_3$,如图 7 所示。

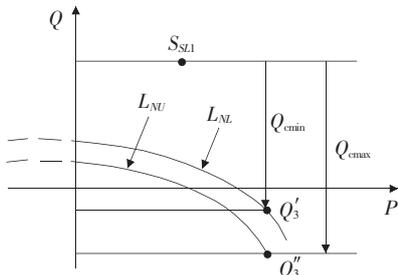


图 7 风电场无功补偿量确定

Figure 7 Reactive power compensation determination of wind farm

按照上述方法确定风电场无功配置容量,若风电场接入点发生电压越限,只要无功补偿量在 (Q_{\min}, Q_{\max}) 范围内,就能使接入点功率在负荷安全域中,保证接入点电压不会超过设定的电压上、下限。

5 算例分析

5.1 风电场建模

在 MATLAB/Simulink 搭建图 5 所示的风电场接入电网模型,并进行不同风速和不同负荷场景下的风电场无功补偿的仿真。该风电场由 30 台单机容量为 1.5 MW 的双馈风电机组组成。仿真时将 30 台风电机组视为一台等值机组,并且风电机组采用恒定电压控制模式。双馈风电机组出口电压 690 V,经过箱式变压器升压接入到 35 kV 集电线路,然后再由升压站主变压器升压到 110 kV 接入电网,母线 B_4 、 B_5 分别接入负荷 S_{L1} 、 S_{L2} 。

中国制定的《分布式电源接入配电网相关技术规范》规定,风电场并网点要求在静态时电压处于 90%~110% 额定电压下能够正常运行,但由于风速变化和负荷波动等影响因素,并网点理想电压运行区间一般在 -3%~7% 额定电压。设定母线 B_2 、 B_3 分别为负荷安全域的首端和末端,首端电压额定值 1.05 p. u.,末端电压上限值和下限值分别为 1.0 p. u. 和 0.97 p. u.。

5.2 风速变化

设定在 5 s 时,双馈风电机组的风速为 5 m/s,此后风速分别逐渐增加至 11 m/s 和 12 m/s,并记录每个风速下,母线 B_2 、 B_3 的电压值和有功功率 P_3 和无功功率 Q_3 ,负荷 $S_{L1} = 15 + j8 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

根据第 4 节的无功容量配置方法,计算出风电场所需配置的无功容量范围(0.093~0.126) p. u.,该文取基准功率为 100 MV·A。

由表 1、表 2 和图 8 可见:

- 1) 未补偿前,风速 12 m/s 时风电场集电线路末端电压低于安全下限值,并且末端功率在安全域外面;
- 2) 补偿后,集电线路末端功率在安全域里面,且末端电压高于下限值;
- 3) 补偿后,集电线路的压降也减小;

4) 只要集电线路末端功率在给定的安全域里面, 线路电压都在理想范围内。

表 1 不同风速初始条件下母线 B_2 、 B_3 的电压和功率

Table 1 Voltage and power of bus B_2 and B_3 under different wind speed initial conditions

风速/(m·s)	B_2 /p.u.	B_3 /p.u.	P_3 /p.u.	Q_3 /p.u.
11	1.015	0.973	0.162	0.067 5
12	1.015	0.966	0.211	0.022 8

表 2 不同风速无功补偿后母线 B_2 、 B_3 的电压和功率

Table 2 Voltage and power of bus B_2 and B_3 under different wind speed after reactive power compensation

风速/(m·s)	B_2 /p.u.	B_3 /p.u.	P_3 /p.u.	Q_3 /p.u.
11	1.015	0.973	0.162	0.067 5
12	1.019	0.997	0.212	-0.045 1

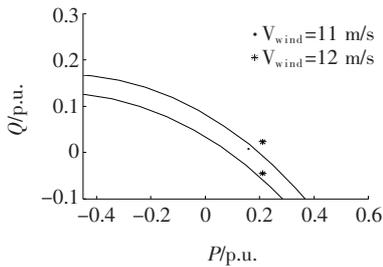


图 8 不同风速补偿前后负荷点与安全域的关系

Figure 8 Relationship between the load point and the safety area without and with the reactive power compensation under different wind speeds

5.3 负荷变化

设定风速在 11 m/s, 给出 2 组负荷 S_{L1} , 同样记录不同负荷时, 母线 B_2 、 B_3 的电压值、有功功率 P_3 和无功功率 Q_3 。

由表 3、4 和图 9 可见:

1) 当负荷较小, 风电场集电线路末端功率在安全域内, 则线路电压高于下限值;

2) 负荷增大, 进行无功补偿后集电线路末端的功率在安全域内, 线路电压高于设定的下限值;

3) 线路功率在安全域内, 线路末端电压就不会高于电压上限值。

表 3 不同负荷无功补偿前母线 B_2 、 B_3 的电压和功率

Table 3 Voltage and power of bus B_2 and B_3 for different load before reactive power compensation p. u.

负荷	B_2	B_3	P_3	Q_3
0.15+j0.08	1.015	0.973	0.162	0.067 5
0.30+j0.20	1.011	0.950	0.156	0.035 9

表 4 不同负荷无功补偿后母线 B_2 、 B_3 的电压和功率

Table 4 Voltage and power of bus B_2 and B_3 for different load after reactive power compensation p. u.

负荷	B_2	B_3	P_3	Q_3
0.15+j0.08	1.015	0.973	0.162	0.067 5
0.30+j0.20	1.020	0.995	0.157	-0.022 8

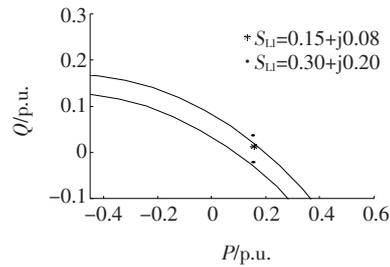


图 9 不同负荷补偿前后负荷点与安全域的关系

Figure 9 Relationship between the load point and the safety area without and with the reactive power compensation under different loads

6 结语

针对风电场并网引起的无功电压越限问题, 提出基于负荷安全域的风电场无功容量配置及规划的方法。

1) 分析研究双馈风电机组的功率曲线与线路负荷安全域的配合问题, 得到风电场集电线路选型的依据。

2) 根据接入点电压要求, 可计算出风电场实际的无功容量大小。算例表明, 根据该方法计算出的无功容量, 能满足风电场运行时并网点电压的要求。

该负荷安全域理论方法对双馈风电场无功容量配置及规划具有一定实际意义。

参考文献:

- [1] 池喜洋, 竺炜, 刘长富, 等. 含大型风电场的电网安全经济优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 125-131.
CHI Xiyang, ZHU Wei, LIU Changfu, et al. Security and economic optimization dispatch for power grid integrating large-scale wind farm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 125-131.
- [2] 严干贵, 王茂春, 穆钢, 等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 98-104.

- YAN Gangui, WANG Maochun, MU Gang, et al. Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study[J]. Transactions Of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 98-104.
- [3] 崔杨, 彭龙, 仲悟之, 等. 双馈型风电场群无功分层协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4300-4307.
- CUI Yang, PENG Long, ZHONG Wuzhi, et al. Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4300-4307.
- [4] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62-66+70.
- SUN Tao, WANG Weisheng, DAI Huizhu. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-66+70.
- [5] 刘其辉, 王志明. 双馈式变速恒频风力发电机的无功功率机制及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 82-89.
- LIU Qihui, WANG Zhiming. Reactive power generation mechanism & characteristic of doubly fed variable speed constant frequency wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 82-89.
- [6] 竺炜, 巫晓云, 刘校锋, 等. 提高电网静态安全鲁棒性的风电接入点选择方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 23-28.
- ZHU Wei, WU Xiaoyun, LIU Xiaofeng, et al. Selection method of wind power access point for improving the static security robustness of power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 23-28.
- [7] 张晓英, 张艺, 王琨, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 55-64.
- ZHANG Xiaoying, ZHANG Yi, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generations based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 55-64.
- [8] 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.
- [9] 盛四清, 陈安, 杨少波. 双馈式风电场多阶段无功电压控制策略[J]. 现代电力, 2015, 32(5): 89-94.
- SHENG Siqing, CHEN An, YANG Shaobo. Multi-stage reactive power and voltage control strategy of DFIG based on wind farms[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(5): 89-94.
- [10] 刘京波, 宋鹏, 吴林林, 等. 风电场无功电压控制系统运行现状及提升措施分析[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 130-138.
- LIU Jingbo, SONG Peng, WU Linlin, et al. Operation situation analysis and improvement measures for automatic voltage control system of wind farms[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 130-138.
- [11] 竺炜, 凌晨, 张玉龙, 等. 基于电压水平约束的电网负荷安全域[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6389-6400+6604.
- ZHU Wei, LING Chen, ZHANG Yulong, et al. Grid load security domain based on voltage level constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6389-6400+6604.
- [12] 竺炜, 张玉龙, 茹梁, 等. 基于负荷安全域的 10kV 配网无功配置方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 73-79.
- ZHU Wei, ZHANG Yulong, RU Liang, et al. Research on reactive power configuration method of 10 kV distribution network based on load security region[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2016, 31(4): 73-79.
- [13] 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.
- [14] 古庭赞, 张羽, 赵阳羊, 等. 适用于电力系统动态分析的双馈式感应风机模型[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 7-14.
- GU Tingzan, ZHANG Yu, ZHAO Yangyang, et al. Model of doubly-fed induction generator applicable to power system dynamic analysis[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 7-14.