

风储共存于配网的动态优化潮流分析

孙东磊¹, 韩学山¹, 李文博²

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002)

摘要: 为适应未来电网发展,在日前时间级,建立以向输电网购电量最小为目标的风储共存配网动态优化潮流的数学模型。该模型在配网原有条件的基础上,考虑了普通异步风电系统、双馈感应风电系统和蓄电池储能系统的特性和限制条件。基于GAMS平台,通过调用CONOPT求解器对该模型进行求解。以12节点风储共存的配网为例,对多种方式进行机制分析发现,普通异步风电系统、双馈感应风电系统和蓄电池储能系统共存于配网中运行时,可解决有功、无功和电压间存在相互牵制的矛盾,考虑风储运行特性的动态优化可更有效地接纳风电,使资源得到有效配置。

关键词: 配电; 风电; 储能; 动态优化潮流; 四象限调节特性; 模型

中图分类号: TM 744; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.017

0 引言

优化潮流概念的核心出自输电网,如今在理论研究和实践上已相对成熟^[1-3]。以受电为主的配网则注重以降低网损、改善电压水平以及实现自动化等为目的的无功优化^[4]和重构^[5]等方面的研究。

风电等可再生能源发电正以分布式逐渐地、且有迅猛发展趋势地接入配网,使配网的运行与控制面临挑战。一方面,配网中电源的接入改变了传统配网的纯受端特性,逐步会显现有源的特性,由此必须考虑配网运行中有功平衡的运行方式如何决策;另一方面,风电等可再生能源发电具有间歇性和波动性,也使配网运行中有必要考虑有功备用及其调控问题,以减轻输电网调控的压力。这样,配网的优化潮流研究显得尤为必要^[6]。为抑制或补偿其特有的波动性和间歇性,往往采用储能等措施,以有效接纳可再生能源的发电^[7-9]。可见,在这种情景下,配网运行的决策必须是一个动态的问题,即动态优化潮流^[10]。

实际上,主动配网概念提出^[11-12]的主要原因,就是应对上述问题,这些问题也是目前研究的热点。文献[13]在配网无功优化中考虑了双馈风电系统的无功调节能力;文献[14]建立了考虑分布式发电和配网损耗折中关系的优化潮流模型,但在模型中没有考虑风电等的调节特性;文献[15]提出了求解考虑大规模储能的优化潮流问题的半定规划法,一定程度上提高了求解效率,但其没有考虑储能系统有功、无功之间的制约关系,而且文中的半定规划条件

无法保证满足^[16];文献[17]在配网动态优化潮流模型中考虑了储能系统的有功、无功两方面的调节能力,有效减少了弃风量和无功需求,但将风电场出力按恒功率因数处理,削弱了风电系统无功调节特性的作用。

针对风储共存的配网,本文提出了动态优化潮流的模型,该模型充分考虑风电和储能系统的有功、无功调节能力,实现有效接纳风电。通过算例分析可以发现,当配网中风储共存时,有功、无功和电压间存在紧密的耦合,动态的优化可使这些资源的价值更有效地发挥,表明了考虑风储调节特性的有效性和必要性。该研究可为分布式电源接入配网时如何配置调节资源提供参考。

1 风储系统的特性

风储系统特性是动态优化潮流模型建立的基础,本节给出普通异步风电系统、双馈感应风电系统和蓄电池储能系统运行的有功-无功功率特性。

1.1 异步风电系统的特性

普通异步风力发电机组简化等值电路如图1所示。其中, $x = x_1 + x_2$, x_1 、 x_2 分别为定子、转子电抗; r_2 为转子电阻; x_m 为激磁电抗; s 为转差率,且 $s < 0$; U_a 为机端电压幅值。风电机组发出的有功功率 P_a 和无功功率 Q_a 分别为:

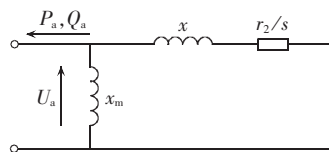


图1 普通异步风力发电机组简化等值电路图

Fig.1 Simplified equivalent circuit of common asynchronous wind power generator

收稿日期:2014-10-30;修回日期:2015-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177091,51477091);
国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB228205)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177091,51477091) and the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228205)

$$P_a = \frac{-U_a^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x^2} = \frac{U_a^2}{R_{eq}(s)} \quad (1)$$

$$Q_a = -\frac{U_a^2}{x_m} - \frac{U_a^2 x}{(r_2 / s)^2 + x^2} = \frac{-U_a^2}{X_{eq}(s)} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知, $Q_a < 0$, 表示异步风机吸收无功功率。在风机有功输出确定的情况下, 风机输出的无功功率可表示为:

$$Q_a = -\frac{U_a^2}{x_m} - \frac{U_a^2 - \sqrt{U_a^4 - 4P_a^2 x^2}}{2x} \quad (3)$$

异步风电机组从风力机获得的最大功率 $P_a^{\max}$ 取决于风速 v , 可由不同风速下的出厂试验数据插值拟合得到^[18]:

$$P_a^{\max} \approx \sum_{i=0}^8 a_i v^i \quad (4)$$

式(3)和式(4)即构成了普通异步风力发电机组的有功-无功特性。可看出, 风电机组的电磁功率是电网电压和等值阻抗的函数, 通过自动调整自身的转差进而改变等值阻抗以调节电磁转矩实现与风力机械转矩的平衡; 当 $0 < |s| \leq r_2/x$ 时, $dP_a/ds > 0$, 表示转差会相应增加以接纳风电; 当 $|s| > r_2/x$ 时, $dP_a/ds < 0$, 表示转差的进一步增加也不会接纳更多的风电。

1.2 双馈感应风电系统的特性

双馈感应风电机组因使用双 PWM 全控型变流器控制励磁电流, 从而可以实现变速恒频运行的特点, 使其成为了风力发电的主流机型。一方面由于双馈感应发电机转子和定子间的电磁关系, 转子侧有功功率为定子侧有功功率的转差功率, 另一方面, 机组控制系统可以通过改变励磁电流的幅值和相位实现独立调节输出有功和无功功率的功能。双馈感应风机功率关系如图 2 所示。

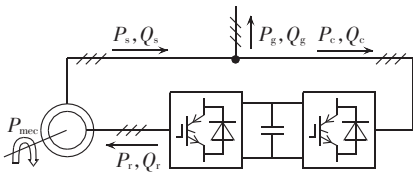


图 2 双馈感应风机功率关系

Fig.2 Power relationship of DFIG

图 2 中, P_{mec} 为风机输入的机械功率; P_s, Q_s 分别为定子侧发出的有功和无功功率; P_r, Q_r 分别为网侧变流器从电网吸收的有功和无功功率; P_g, Q_g 分别为双馈感应风机系统与电网交互的有功和无功功率。当忽略定、转子损耗时, 该功率关系可表示为:

$$\begin{cases} P_g = P_s - P_r = P_{mec} \\ P_s = P_g / (1-s) \\ P_r = sP_g / (1-s) \\ Q_g = Q_s - Q_r \end{cases} \quad (5)$$

P_{mec} 的上限值 $P_g^{\max}$ 基于风速预测可由下式得到^[19]:

$$P_g^{\max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 c_p(\beta, \lambda) \quad (6)$$

$$\begin{cases} c_p(\beta, \lambda) = 0.22(116\lambda_1 - 0.4\beta - 5)e^{-12.5\lambda_1} \\ \lambda_1 = 1/(\lambda + 0.08\beta) - 0.035/(\beta^3 + 1) \\ \lambda = [(r_s/k) \cdot (2\pi/60) \cdot R]/v \end{cases} \quad (7)$$

其中, ρ 为空气密度; R 为叶片半径; c_p 为风能利用系数; β 为桨距角; λ 为叶尖速比; k 为齿轮箱比。桨距角和风机转子转速需满足一定的运行范围, 即:

$$\begin{cases} \beta^{\min} \leq \beta \leq \beta^{\max} \\ r_s^{\min} \leq r_s \leq r_s^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中, 上标 max、min 分别表示对应变量允许的上限值和下限值, 下同。

双馈风电机组定子端功率和转子电流之间的关系在电网电压定向同步 dq 坐标系下可表示为^[20]:

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{2P_s L_s}{3U_s L_m} \\ i_{rq} = \frac{-2Q_s L_s}{3U_s L_m} - \frac{U_s}{\omega_1 L_m} \end{cases} \quad (9)$$

其中, i_{rd}, i_{rq} 分别为转子侧电流的 d 轴分量和 q 轴分量; L_s, L_m 分别为定子漏感和定转子互感; ω_1 为同步坐标旋转速度。双馈风电机组定子侧有功和无功功率运行范围主要受转子侧变流器的电流限制^[21], 该限制可表示为:

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_s}\right)^2 \leq \left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_r^{\max}\right)^2 \quad (10)$$

其中, U_s 为机端电压; X_s 和 X_m 分别为定子电抗和激磁电抗; I_r 为转子侧变流器电流, $I_r^{\max}$ 为其允许的上限值。可以看出, 双馈感应风机在有功功率输出确定的前提下, 具有一定的电压支撑能力。

为改善双馈感应风电系统并网后的电网电压水平, 通常采用以风电场并网点为主导节点的二次电压控制, 由全局的无功优化来给定主导节点电压参考值, 风电场级闭环的自动电压控制追踪主导节点电压。但由于主导节点电压参考值的优化依赖于风电场的无功电压调节能力, 而主导节点电压参考值又影响风电场的调控策略。本文提出用互补理论来表示两者的牵制关系以表达风电场无功电压控制的分离特性, 该特性具体体现在风电场在不同的运行条件下采用不同的控制策略, 即追踪主导节点电压设定值或按最大、最小无功功率输出的极限运行。本文分析中取风电场所在节点为主导节点, 用 U_{pilot} 表示主导节点电压, 互补约束可表示为:

$$\begin{cases} U_{pilot} \geq U_{pilot}^{\text{set}} & Q_{DF} = Q_{DF}^{\min} \\ U_{pilot} = U_{pilot}^{\text{set}} & Q_{DF}^{\min} < Q_{DF} < Q_{DF}^{\max} \\ U_{pilot} \leq U_{pilot}^{\text{set}} & Q_{DF} = Q_{DF}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

其中, 上标 set 表示相应变量的参考值; Q_{DF} 为风电系统发出的无功功率。

1.3 蓄电池储能系统的特性

蓄电池储能系统由蓄电池储能单元和双向功率调节系统(PCS)组成。PCS 主要由全控型电压源变流器构成,其交流侧具有独特的受控电压源特性,实现四象限运行。因此,PCS 不仅可实现满足蓄电池充、放电要求的双向有功功率可控,还具有等同于静止同步补偿器的功能进行无功功率调节。蓄电池储能系统运行中的有功无功调节特性主要受 PCS 电流限制^[22],该限制可表示为:

$$P_{\text{Ess}}^2 + Q_{\text{Ess}}^2 \leq (U_{\text{Ess}} I_{\text{PCS}}^{\text{max}})^2 \quad (12)$$

其中, P_{Ess} 、 Q_{Ess} 分别为运行中储能系统与电网交互的有功和无功功率; U_{Ess} 为储能系统交流侧电压; I_{PCS} 为 PCS 电流, $I_{\text{PCS}}^{\text{max}}$ 为其允许的上限值。上式表明储能系统运行于以 PCS 容量 $U_{\text{Ess}} I_{\text{PCS}}^{\text{max}}$ 为半径的四象限功率圆内, $P_{\text{Ess}} > 0$ 表示储能系统放电, $P_{\text{Ess}} < 0$ 表示储能系统充电, $Q_{\text{Ess}} > 0$ 表示储能系统发出感性无功功率, $Q_{\text{Ess}} < 0$ 表示储能系统吸收感性无功功率。

蓄电池储能系统安装成本较高,如何最大化利用其有功和无功调节能力以实现配网安全经济运行是本文研究的主要内容之一。

2 动态优化模型

储能充放电过程使时段之间存在关联,风储共存的配网优化是含时间耦合约束的动态优化问题。

2.1 目标函数

配网经济运行追求最大化利用配网内的可再生能源发电和最小化配电网损耗,以上两目标综合体现为追求从输电网购电量最小。因此,配网动态优化潮流的目标函数可取为研究周期内配网从输电网购电量最小,即:

$$\min F = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_B} P_{\text{ex},i}(t) \Delta T \quad (13)$$

其中, N_T 为研究周期内所划分时段数, $N_T = 24$; N_B 为配网节点数; $P_{\text{ex},i}(t)$ 为 t 时段配网节点 i 与外部输电网交换的有功功率; ΔT 为时段延续时间, $\Delta T = 1$ h。

2.2 约束条件

2.2.1 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{G,i}(t) - P_{D,i}(t) = \sum_{l \in N_L(i)} P_{l,ij}(t) \\ Q_{G,i}(t) - Q_{D,i}(t) = \sum_{l \in N_L(i)} Q_{l,ij}(t) \end{cases} \quad i \in N; t \in T \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{l,ij} = U_i^2 g_l - U_i U_j (g_l \cos \theta_{ij} + b_l \sin \theta_{ij}) \\ Q_{l,ij} = -U_i^2 b_l + U_i U_j (b_l \cos \theta_{ij} - g_l \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad l \in N_L \quad (15)$$

其中, N 为配网节点集合; T 为时段集合; $P_{G,i}(t)$ 、 $Q_{G,i}(t)$ 分别为 t 时段节点 i 上所有电源注入的总有功功率和总无功功率, $P_{G,i}(t) = P_{\text{CA},i}(t) + P_{\text{DF},i}(t) + P_{\text{Ess},i}(t) + P_{\text{ex},i}(t)$, $Q_{G,i}(t) = Q_{\text{CA},i}(t) + Q_{\text{DF},i}(t) + Q_{\text{Ess},i}(t) + Q_{\text{ex},i}(t)$, P_{CA} 、 P_{DF} 、 P_{Ess} 和 P_{ex} 分别为普通异步风电系统、双馈感应风电

系统、储能系统和外部输电网注入的有功功率, Q_{CA} 、 Q_{DF} 、 Q_{Ess} 和 Q_{ex} 分别为普通异步风电系统、双馈感应风电系统、储能系统和外部输电网注入的无功功率; $P_{D,i}$ 、 $Q_{D,i}$ 分别为节点 i 上负荷有功和无功功率; $N_L(i)$ 为与节点 i 相连的支路集合; $P_{l,ij}$ 、 $Q_{l,ij}$ 分别为支路 l (其两端节点分别为节点 i 、 j) 的有功和无功功率; N_L 为配网支路集合; g_l 、 b_l 分别为支路 l 的电导和电纳; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相角差。

2.2.2 节点电压和支路电流约束

节点电压幅值约束:

$$U_i^{\min} \leq U_i(t) \leq U_i^{\max} \quad i \in N; t \in T \quad (16)$$

支路允许热电流约束:

$$|I_{l,ij}(t)| \leq I_l^{\max} \quad l \in N_L; t \in T \quad (17)$$

其中, $I_{l,ij}(t)$ 为 t 时段支路 l 的电流值,其可以表示为式(18)。

$$|I_{l,ij}| = |Y_l| (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij})^{1/2} \quad (18)$$

其中, Y_l 为支路 l 的导纳。

2.2.3 风力发电运行范围约束

风力发电运行范围约束由风力发电设备自身特性和节点电压共同决定,即由上述的式(1)—(11)所描述。

2.2.4 储能系统运行范围约束

蓄电池储能系统充放电过程能量平衡方程:

$$E_{\text{Ess},j}(t+1) = E_{\text{Ess},j}(t) + R_{\text{Ess},j}(t) \Delta T \quad j \in N; t \in T \quad (19)$$

$$R_{\text{Ess},j}(t) = \begin{cases} P_{\text{Ess},j}(t) \eta_{\text{ch}} & P_{\text{Ess},j}(t) < 0 \\ P_{\text{Ess},j}(t) / \eta_{\text{dis}} & P_{\text{Ess},j}(t) > 0 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $E_{\text{Ess},j}(t)$ 、 $R_{\text{Ess},j}(t)$ 分别为节点 j 上蓄电池在 t 时段的储能电量和充放电能量转化速率; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为蓄电池充电、放电效率。

蓄电池能量存储上下限约束:

$$E_{\text{Ess},j}^{\min} \leq E_{\text{Ess},j}(t) \leq E_{\text{Ess},j}^{\max} \quad j \in N; t \in T \quad (21)$$

首末时段储能电量状态等式约束^[15]:

$$E_{\text{Ess},j}(N_T+1) = E_{\text{Ess},j}(1) = E_{\text{init},j} \quad j \in N \quad (22)$$

其中, E_{init} 为初始储能电量。

2.3 模型说明

式(1)—(22)构成了本文风储共存的配网的动态优化潮流的数学模型,在购电量最小目标的驱使下,必然要求配网充分利用本地的风电以减少对外部输电网的功率需求,然而受制于配电网的制约,配网对风电的接纳能力受到限制。对此,在深入挖掘风电和储能系统调节能力的基础上,以风电系统有功、无功功率,储能系统有功、无功调节功率为决策变量,考虑上述约束,在保证配网安全运行的前提下,追求配网购电量最小。

式(14)表示的节点功率平衡方程虽然在形式上与输电网优化潮流中的潮流方程相同,但是由于配

电线路与输电线路不同的参数特征,具体表现为较大的电阻电抗比,使配网潮流中有功与无功间耦合更紧密,有功对电压的影响程度增大;式(1)—(11)表示的风力发电运行范围是有功、无功和电压共同作用的结果,当风电系统调节能力得以充分利用时,必将出现有功调节与无功调节的让位关系,无功功率机会成本体现更明显,这一效应也会进一步反映至整个配网,成为配网的重要特征;式(19)—(22)表示的储能过程的时间关联约束使优化决策能够在整体上协调配网各时段运行状态。

上述配网动态优化潮流模型为非线性规划问题,在具体求解与分析中,本文基于 GAMS 平台,通过调用 CONOPT 求解器对其进行求解。

3 算例分析

3.1 算例系统

以图 3 所示的 12 节点配网为例进行分析。风储系统接入方案为:节点 7、节点 8 和节点 10 分别接入 6 台双馈风力发电机组;节点 12 接入 12 台异步风力发电机组;节点 6 接入 10 台蓄电池储能系统。电网结构参数、风速数据、异步风力发电参数、双馈风力发电参数、储能系统参数、各节点负荷数据见表 1—8,表 1 中电阻、电抗、电流上限为标么值。运行中要求各节点电压在 0.95~1.05 p.u. 之间。各储能单元初始时段储能电量为 0。

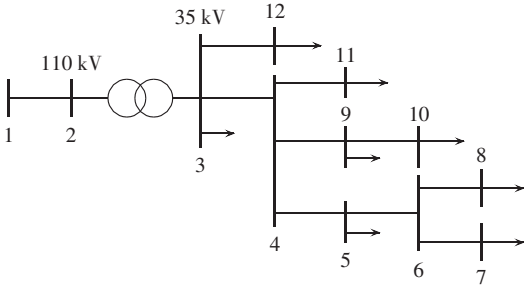


图 3 配网算例图

Fig.3 Distribution network for case study

表 1 12 节点配网支路参数

Table 1 Branch parameters of 12-bus distribution network

支路编号	首节点	末节点	电阻	电抗	非标准变比	电流上限
1	1	2	0.028	0.068	1.00	0.560
2	2	3	0	0.013	1.05	0.600
3	3	4	0.110	0.300	1.00	0.214
4	4	5	0.380	0.340	1.00	0.214
5	5	6	0.380	0.340	1.00	0.214
6	6	7	0.380	0.340	1.00	0.214
7	6	8	0.380	0.340	1.00	0.214
8	4	9	0.380	0.340	1.00	0.214
9	9	10	0.380	0.340	1.00	0.214
10	4	11	0.320	0.910	1.00	0.214
11	3	12	0.430	1.220	1.00	0.214

表 2 24 h 风速数据

Table 2 Wind speed data for 24 hours

时段	风速/(m·s ⁻¹)	时段	风速/(m·s ⁻¹)	时段	风速/(m·s ⁻¹)
1	10.3	9	8.4	17	9.8
2	10.2	10	7.5	18	9.0
3	10.3	11	7.5	19	9.4
4	10.5	12	8.1	20	9.3
5	9.5	13	8.5	21	8.0
6	9.1	14	8.5	22	8.1
7	10.0	15	8.1	23	7.5
8	9.8	16	9.0	24	8.5

表 3 普通异步风力发电机参数

Table 3 Parameters of common asynchronous wind power generator

参数	取值	参数	取值
定子电阻	0.00708 Ω	激磁电抗	3.44979 Ω
定子电抗	0.0762 Ω	额定电压	660 V
转子电阻	0.00759 Ω	额定功率	330 kW
转子电抗	0.23289 Ω		

表 4 普通异步风力发电机功率特性系数

Table 4 Power characteristic coefficients of common asynchronous wind power generator

系数	取值	系数	取值	系数	取值
a_0	-393.35	a_3	65.71	a_6	-0.0804
a_1	468.91	a_4	-10.95	a_7	0.0035
a_2	-237.49	a_5	1.16	a_8	-9.49×10 ⁻⁵

表 5 双馈风力发电机参数

Table 5 Parameters of DFIG

参数	取值	参数	取值
定子电阻	0.0076 Ω	转速下限	850 r/min
定子电抗	0.1248 Ω	转速额定值	1500 r/min
转子电阻	0.0073 Ω	齿轮箱变比	83.33
转子电抗	0.0884 Ω	定子电流上限	2900 A
激磁电抗	1.8365 Ω	转子电流上限	3000 A
额定电压	690 V	$\beta_{\max}$	90°
额定功率	2 MW	$\beta_{\min}$	-2°
转速上限	1800 r/min		

表 6 储能系统参数

Table 6 Parameters of energy storage system

参数	取值	参数	取值
储能上限	10 MW·h	视在功率上限	2 MV·A
储能下限	0	放电效率	1
PCS 电流上限	57.14 A	充电效率	1

3.2 算例分析

3.2.1 风电无功特性的影响机制分析

这里主要对比以下 2 种方案:仅考虑风电恒功率因数运行的配网有功优化潮流(DCOPF);考虑风电无功特性下的交流优化潮流(ACOPF)。两方案下配网总有功功率需求如图 4 所示。

由图 4 可知,单纯的有功优化潮流方案与考虑风电无功特性的优化潮流方案相比,后者比前者对主输电网的总有功功率需求要大,特别是在风电大

表 7 各负荷节点有功功率负荷
Table 7 Active power of load nodes

时段	有功功率负荷/MW								
	节点 3	节点 5	节点 6	节点 7	节点 8	节点 9	节点 10	节点 11	节点 12
1	3.120	0.311	1.200	0.269	1.740	1.740	1.740	3.929	5.556
2	2.680	0.274	0.900	0.262	1.580	1.770	1.770	2.914	4.452
3	2.510	0.277	1.020	0.255	1.220	1.540	1.540	2.671	4.116
4	2.220	0.253	0.900	0.217	1.150	1.550	1.550	3.171	3.960
5	2.140	0.238	0.960	0.221	1.320	1.450	1.450	3.043	5.040
6	2.410	0.219	1.140	0.303	1.540	1.540	1.540	3.429	5.592
7	3.090	0.247	0.900	0.448	1.950	2.070	2.070	5.329	6.636
8	3.140	0.253	1.020	0.545	2.300	2.260	2.260	6.343	8.688
9	4.310	0.344	1.260	0.610	1.880	1.790	1.790	8.243	8.724
10	4.950	0.426	2.160	0.586	1.760	1.550	1.550	6.986	8.292
11	5.290	0.496	2.580	0.614	1.810	1.430	1.430	6.471	8.964
12	5.700	0.512	2.820	0.645	1.630	1.660	1.660	6.857	9.888
13	5.290	0.460	2.100	0.617	1.970	1.800	1.800	7.871	11.172
14	4.970	0.439	2.100	0.600	1.720	1.440	1.440	7.486	9.828
15	4.290	0.372	1.560	0.593	1.920	1.540	1.540	8.000	8.040
16	5.190	0.506	2.700	0.679	1.470	1.450	1.450	6.214	7.860
17	5.360	0.460	2.580	0.497	1.480	1.260	1.260	5.971	8.904
18	5.160	0.457	2.040	0.466	1.640	1.210	1.210	5.971	8.568
19	5.240	0.369	1.500	0.538	1.740	1.390	1.390	6.086	8.940
20	5.040	0.378	1.380	0.641	2.040	1.690	1.690	6.986	9.708
21	5.550	0.366	1.560	0.797	2.320	1.900	1.900	10.286	11.856
22	4.920	0.366	2.040	0.707	2.030	1.810	1.810	9.643	10.752
23	4.410	0.372	2.160	0.514	1.390	1.340	1.340	6.857	7.920
24	3.310	0.311	1.800	0.321	0.960	1.040	1.040	4.186	6.696

表 8 各负荷节点无功功率负荷
Table 8 Reactive power of load nodes

时段	无功功率负荷/Mvar								
	节点 3	节点 5	节点 6	节点 7	节点 8	节点 9	节点 10	节点 11	节点 12
1	0.970	0.031	0.360	0.031	1.050	0.380	0.380	0.514	1.260
2	0.880	0.027	0.120	0.045	1.080	0.380	0.380	0.386	1.044
3	0.930	0.028	0.300	0.041	1.070	0.260	0.260	0.257	0.888
4	0.780	0.025	0.120	0.028	0.920	0.330	0.330	0.757	0.924
5	0.880	0.024	0.240	0.034	0.960	0.300	0.300	0.386	1.416
6	0.760	0.022	0.300	0.052	1.020	0.330	0.330	0.386	1.500
7	0.780	0.025	0.060	0.090	0.750	0.420	0.420	1.014	1.848
8	0.830	0.025	0.120	0.117	0.800	0.490	0.490	1.400	2.580
9	2.020	0.034	0.240	0.141	0.900	0.500	0.500	2.029	2.952
10	2.560	0.043	0.900	0.138	0.960	0.440	0.440	1.643	3.072
11	2.580	0.050	1.020	0.197	0.880	0.330	0.330	1.271	3.096
12	2.730	0.051	1.200	0.203	0.600	0.380	0.380	1.529	3.504
13	1.750	0.046	0.540	0.124	0.460	0.170	0.170	1.643	2.520
14	1.710	0.044	0.480	0.124	0.360	0.140	0.140	1.400	2.400
15	2.220	0.037	0.420	0.121	0.880	0.410	0.410	1.900	2.796
16	2.580	0.051	1.020	0.152	1.100	0.330	0.330	1.143	2.976
17	2.660	0.046	0.900	0.159	1.150	0.340	0.340	1.143	3.192
18	2.480	0.046	0.660	0.134	0.780	0.270	0.270	1.271	3.012
19	2.090	0.037	0.300	0.141	0.720	0.280	0.280	1.271	3.096
20	1.580	0.038	0.240	0.138	0.720	0.220	0.220	1.771	2.856
21	1.580	0.037	0.360	0.117	0.390	0.170	0.170	1.529	2.520
22	1.240	0.037	0.600	0.100	0.370	0.190	0.190	1.643	2.304
23	1.140	0.037	0.960	0.066	0.710	0.080	0.080	1.014	1.776
24	0.930	0.031	0.780	0.045	0.810	0.030	0.030	0.629	1.872

发的时段,无功传输限制制约了对风电的接纳。显然,考虑电压无功因素影响的决策更符合实际,单纯的有功优化潮流决策高估了配网的风电接纳能力,而且其并不一定保证实际交流潮流可行,还需进行

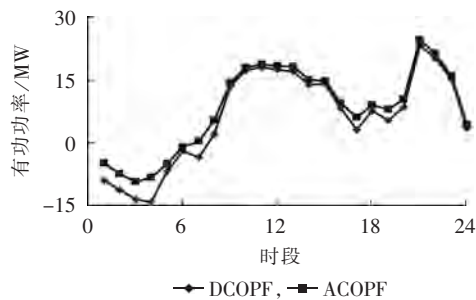


图 4 配网总有功功率需求

Fig.4 Total active power demand of distribution network

无功优化决策以判断是否可行。针对本算例的无功优化决策表明,在时段 1—4、7、8、17—20,由于受无功传输限制,单纯的有功优化潮流解不可行。若在这些时段仅考虑储能的无功调节作用,则变为可行。

3.2.2 加入储能特性的机制分析

为分析储能对配网接纳风电的影响,在考虑风电无功调节特性的基础上,对比以下 3 种优化方案:方案 1,不考虑储能的配网优化潮流;方案 2,考虑储能有功调节能力的配网优化潮流;方案 3,考虑储能有功-无功调节能力的配网优化潮流。3 种方案下配网风电接纳情况、总有功功率需求和总无功功率需求情况如图 5—8 所示。

由图 5 可知,考虑储能会提高配网对风电的接纳能力,特别是在风电大发的时段,储能使得配网对风电完全消纳。为清晰对比储能的无功调节能力对配网消纳风电的影响,图 8 给出了在原风电节点上

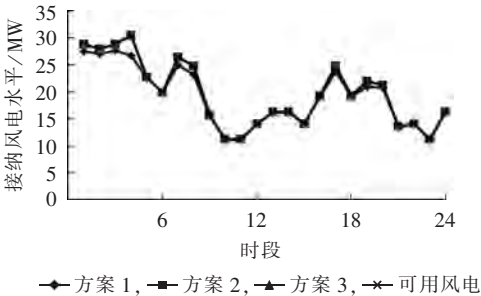


图 5 配网接纳风电情况对比分析

Fig.5 Comparative analysis of distribution network accommodation to wind power

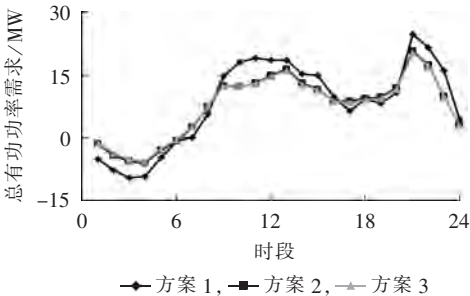


图 6 配网有功需求对比分析

Fig.6 Comparative analysis of active power demand for distribution network

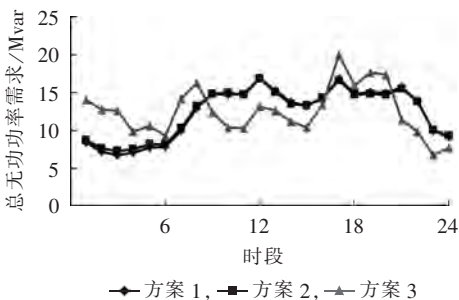


图 7 配网无功需求对比分析

Fig.7 Comparative analysis of reactive power demand for distribution network

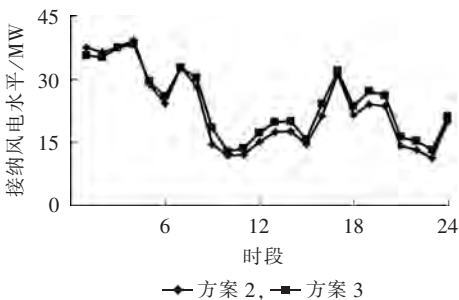


图 8 增加风电装机情况下配网接纳风电情况对比分析

Fig.8 Comparative analysis of distribution network accommodation to wind power for increased wind power capacity

增加风电装机(增至原装机容量 1.3 倍)情况下配网接纳风电的情况对比分析,可知在大多数时段考虑储能的无功调节作用有助于消纳风电,而在风电大发时段不利于接纳风电,其原因在于风电大发时段 PCS 容量限制为紧约束,受储能充放电时段关联约束限制,从而在风电大发时段限制了风电的消纳,但从日风电消纳总量而言,考虑储能的无功调节作用总体上有利于减少弃风。由图 6 可知,储能平滑了配网的日有功需求,起到了削峰填谷的作用,尤其是在考虑储能无功调节能力时该作用更为突出,这在峰谷电价机制下会降低购电成本。对比图 7 和图 5 可知,风电有功功率输出同配网总无功需求有近似相同的趋势,在风电大发时段,配网无功需求也较多,而储能系统则能在一定程度上缓解这一需求。

不同方案下配网日总电量、网损和无功需求如表 9 所示,可以看出不考虑储能、仅考虑储能有功调

表 9 不同方案下配网日总电量、网损和无功需求对比分析

Table 9 Comparison of daily active power demand, net loss and reactive power demand among different schemes

方案	电量/(MW·h)	网损/(MW·h)	无功需求/(Mvar·h)
1	195.35	36.44	296.95
2	178.45	35.53	296.73
3	178.31	35.35	295.01

节能力和考虑储能有功-无功调节能力 3 种优化方案下配网日总电量需求、网损和无功需求依次递减。

3.2.3 有功、无功和电压间的牵制关系分析

以图 8 所示方案 3 时段 2 为例,分析有功、无功和电压间的牵制关系。该时段各节点电压(标么值)如图 9 所示。风储系统输出功率如表 10 所示。

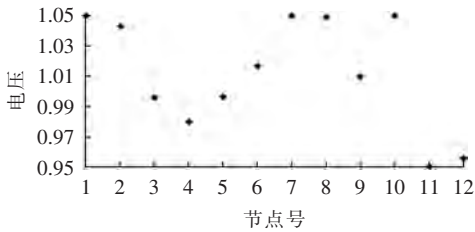


图 9 方案 3 第 2 时段各节点电压幅值

Fig.9 Node voltage magnitude during period 2 of scheme 3

表 10 方案 3 第 2 时段风储系统输出功率

Table 10 Output power of wind power-energy storage system during period 2 for scheme 3

风储系统	可用有功/MW (或容量/(MV·A))	实际有功/MW	实际无功/Mvar
节点 7 双馈风电	13.589	9.971	-2.679
节点 8 双馈风电	13.589	11.243	-1.932
节点 10 双馈风电	13.589	11.216	-2.213
节点 12 异步风电	2.296	2.296	-1.671
节点 6 储能系统	2.068	-1.966	0.368

由图 9 可知,配网末端风电的接入改变了有功流向,从而也改变了传统配网自根节点到末端逐次递减的电压分布。双馈风电机组具有一定的无功电压支撑能力,优化的结果是其偏电压上限运行,配电线路较大的电阻电抗比使得其配电线路压降较大,为改善配网整体的电压水平,优化使得电网末端的双馈风电系统吸收更多的无功功率来中和有功传输带来的电压降落。随着风电功率的增加,双馈风机吸收的无功功率也相应增加,当约束式(10)变为紧约束时,必将出现风机有功出力的削减和节点电压的改变。由表 2 可知,该时段储能 PCS 电流限制为紧约束,说明发挥了最大的储能系统有功-无功调节能力,同时也说明了考虑储能 PCS 视在功率限制^[17]的保守性;节点 7、节点 8 和节点 10 风电出力出现了不同程度的削减,节点 8 电压不再按电压上限值运行。由此可知,风储共存的配电系统中,在风储系统自身特性作用下,有功、无功和电压三者之间存在着紧密的牵制关系,并对配网的风电接纳能力有着重要影响。

4 结论

本文建立风储共存配网动态优化潮流的数学模型,并借助商业软件对其各种情况进行了细致分析,

结论如下:

- a. 由于配网自身的特性,当其内部有风电等分布式电源时,有功和无功存在紧密的耦合,在决策有功功率平衡时,必须考虑电压的支撑;
- b. 因有功、无功、电压间存在关联性,储能系统若能满足四象限调节,对松弛这一关联性有积极的作用;
- c. 风储共存配网中动态优化能更有效地接纳风电,使资源得到有效配置。

参考文献:

[1] CARPENTIER J. Contribution a l'etude du dispatching economique[J]. Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens,1962, 3(8):431-447.

[2] WEI Hua,SASAKI H,KUBOKAWA J,et al. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. IEEE Trans on Power Systems,1998,13 (3):870-877.

[3] ROSEHART W,ROMAN C,SHELLENBERG A. Optimal power flow with complementarity constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems,2005,20(2):813-822.

[4] 王威,韩学山,王勇,等. 配电网络电容器优化投切的作用范围法[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(6):36-40.

WANG Wei,HAN Xueshan,WANG Yong,et al. Action scope algorithm for optimal capacitor switching in distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2008,20(6):36-40.

[5] BARAN M E,WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1989,4(2):1401-1407.

[6] DOLAN M J,DAVIDSON E M,KOCKAR I,et al. Distribution power flow management utilizing an online optimal power flow technique[J]. IEEE Trans on Power Systems,2012,27(2):790-799.

[7] BARTON J,INFIELD D. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004,19(2):441-448.

[8] 南晓强,李群湛. 考虑风功率预测误差分布的储能功率与容量配置法[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):117-122.

NAN Xiaoliang,LI Qunzhan. Energy storage power and capacity allocation based on wind power forecasting error distribution[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):117-122.

[9] 刘春燕,晁勤,魏丽丽. 基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平滑波动[J]. 电力自动化设备,2015,35(2): 35-41.

LIU Chunyan,CHAO Qin,WEI Lili. Wind-storage coupling based on actual data and fuzzy control in multiple time scales for real-time rolling smoothing of fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):35-41.

[10] 王永刚,韩学山,王宪荣. 动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报,1997,17(3):195-198.

WANG Yonggang,HAN Xueshan,WANG Xianrong. Dynamic optimal load flow[J]. Proceedings of the CSEE,1997,17(3): 195-198.

[11] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.

YOU Yi,LIU Dong,YU Wenpeng,et al. Technology and its

- trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [12] 李文博. 输配网潮流与优化的理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- LI Wenbo. Studies on theory of power flow and optimization in power transmission-distribution grid[D]. Ji'nan: Shandong University, 2013.
- [13] 赵晶晶, 符杨, 李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 33-38.
- ZHAO Jingjing, FU Yang, LI Dongdong. Reactive power optimization in distribution network considering reactive power regulation capability of DFIG wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 33-38.
- [14] OCHOA F, HARRISON P. Minimizing energy losses: optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(1): 198-205.
- [15] GAYME D, TOPCU U. Optimal power flow with large-scale storage integration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 709-717.
- [16] ZHANG Baosen, TSE D. Geometry of injection regions of power networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 788-797.
- [17] GABASH A, LI P. Active-reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 2026-2035.
- [18] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [19] 钟沁宏, 阮毅, 赵梅花. 基于最佳功率-转速曲线 DFIG 最大功率点跟踪控制[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 49-52.
- ZHONG Qinrong, RUAN Yi, ZHAO Meihua. Maximum power point tracking for DFIG based on optimum power-velocity curve[J]. Power Electronics, 2013, 47(4): 49-52.
- [20] TAPIA A, TAPIA G, OSTOL X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J]. Renewable Energy, 2004, 29: 377-392.
- [21] 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.
- [22] MILLER N, ZREBIEC R S, HUNT G. Design and commissioning of a 5 MVA, 2.5 MWh battery energy storage system[C]//Proceeding of International Conference on Transmission and Distribution. Los Angeles, USA: IEEE Press, 1996: 339-345.

作者简介:



孙东磊

孙东磊(1988—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事电力系统源网协同理论研究与工程应用技术开发(E-mail: sdsudlei@sina.com);

韩学山(1959—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作;

李文博(1984—), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事电网潮流及其优化理论研究。

Analysis of dynamic optimal power flow for distribution network with wind power and energy storage

SUN Donglei¹, HAN Xueshan¹, LI Wenbo²

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Electric Power Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250002, China)

Abstract: To adapt to the development of future power system, a mathematical model of day-ahead dynamic optimal power flow is built for the distribution network with wind power and energy storage, which takes the minimum electricity purchase from transmission system as its objective and considers the characteristics and limitation conditions of common asynchronous wind power system, double-fed induction wind power system and battery storage system besides the basic operation limits of distribution network. Based on the GAMS platform, the CONOPT solver is adopted to solve the model. Taking a 12-bus distribution network with wind power and energy storage as an example, the mechanism analysis on several patterns shows that, with the dynamic optimization considering the operating characteristics of distribution network with wind power and energy storage, the resources are effectively allocated, the diversion among active power, reactive power and voltage avoided and the wind power more effectively accommodated.

Key words: electric power distribution; wind power; energy storage; dynamic optimal power flow; four-quadrant regulation characteristics; models