

储能系统对并网型风光分布式发电系统输出的影响分析

李久广¹, 刘士荣^{1*}, 宁康红², 周啸波², 邹罗建¹

(1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为解决风力发电和光伏发电等间歇式电源输出功率波动引起的电网电能质量下降问题, 提出了利用储能系统来提高间歇式电源并网点的功率稳定性以及改善电能质量。采用间接组合建模的方法建立基于 PSCAD/EMTDC 的典型风力发电、光伏发电和蓄电池储能的单元模型, 并在此基础上构建风电/储能、光伏/储能、风电/光伏/储能系统, 并进行仿真和电能质量分析。系统仿真结果表明: 储能系统能有效改善间歇式电源功率输出的稳定性和电能质量。

关键词: 风力发电; 光伏发电; 蓄电池储能; 分布式发电; 电能质量

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 03-0051-06

近年来, 以风力发电和光伏发电为代表的间歇式能源得到迅速发展, 并得到世界各国的高度重视, 在满足能源需求、改善能源结构、减少环境污染、保护生态环境、促进经济社会发展等方面发挥了重要作用^[1-3]。由于风电、光伏发电都具有随机性、波动性和间歇性的特点, 导致其输出功率波动较大, 并且随机波动的功率接入电网会影响电网运行稳定性, 进而严重影响了配电网乃至输电网的电能质量^[4-7]。蓄电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)具有快速的功率吞吐能力和灵活的功率调节能力, 将 BESS 与风、光伏发电单元组合, 有利于减少风、光功率输出波动对电网的影响, 提高风光发电系统的稳定, 改善电能质量^[8]。

笔者在风力发电、光伏发电和蓄电池储能系统模型基础上, 构建了并网型风电/储能、光伏/储能、风电/光伏/储能三类系统的仿真模型, 并从蓄电池储能系统对光伏、风电的输出功率波动的平滑角度, 分别对并网型风电/储能、光伏/储能、风电/光伏/储能三类分布式发电系统进行仿真和电能质量分析, 验证了储能系统在并网型风电、光伏以及风光组合发电系统中所起到的平抑功率波动性和改善电能质量方面的重要作用。

1 间歇式能源发电系统的电能质量

1.1 间歇式电源并网对电能质量的影响

风电、光伏等间歇式电源并网其输出功率的随机性和间歇性特点, 当接入电网的比例较高时, 会对电网带来较大的影响: (1) 风电、光伏具有随机性、间歇性特征, 输出功率波动性较大, 会对电网产生一定冲击; (2) 风电、光伏、蓄电池储能等分布式电源大多采用电力电子功率变换装置, 这些电源接入电网会产生严重谐波问题。因此, 对于并网型风光发电系统的电能质量分析, 主要从功率波动和波形畸变两个方面来分析。

1.2 谐波的衡量指标及计算依据

按照国家标准《电能质量公用电网谐波》(GB/T14549-1993), 公用连接点的全部用户向该点注入的谐波总畸变率不超过 5%, 奇次谐波含有率不超过 4%, 偶次谐波含有率不超过 2%。

谐波的衡量指标为谐波含有率 HR_h 和总畸变率 THD 。

某次谐波分量的大小以该次谐波的有效值与基波有效值的百分比表示, 称为该次谐波的含有率 HR_h , h 次电流的含有率可用下式表示:

收稿日期: 2013-02-27.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省科技重大专项资助项目 (2009C11020)。

第一作者: 李久广 (1982—), 男, 河南淮阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 分布式能源电力与微电网。E-mail: lijiuguang1983@sina.com

*通信作者: 刘士荣 (1952—), 男, 浙江湖州人, 博导/教授, 主要研究方向: 新能源电力与智能微电网技术等。E-mail: liushirong@hdu.edu.cn

$$HRI_h = (I_h / I_1) \times 100\% . \quad (1)$$

总谐波畸变率 THD 等于各次谐波有效值的平方和的平方根值与基波有效值的百分比, 而电流总谐波畸变率为:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^M I_h^2}}{I_1} \times 100\% . \quad (2)$$

2 风光储分布式电源系统建模

2.1 风力发电系统模型

风力发电系统由风速、风力机和异步电机三部分组成.

2.1.1 风速模型

文中采用 PSCAD/EMTDC 的风速模型, 模型由 4 个分量组成, 可用下式表示:

$$V_{WIND} = V_{BASE} + V_{GUST} + V_{RAMP} + V_{NOISE} \quad (3)$$

式中: V_{WIND} 为基本分量, $m \cdot s^{-1}$; V_{GUST} 为阵风分量, $m \cdot s^{-1}$; V_{RAMP} 为斜坡分量, $m \cdot s^{-1}$; V_{NOISE} 为噪声分量, $m \cdot s^{-1}$. 基本分量是 1 个常数值; 阵风分量可用 1 个正弦或者余弦函数和不同的余弦函数联合表示; 斜坡分量可用程序内置的函数表示; 噪声分量可用已经定义了的三角波函数表示, 且该函数的频率和幅度可调.

2.1.2 风力机模型

由空气动力学可知, 风力机从风中捕获的机械功率为:

$$P_w = \rho \pi R_w^2 v^3 C_p / 2 , \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度; R_w 为风轮机叶片半径; πR_w^2 为叶片扫过的面积; v 为风速; C_p 为风能利用系数, 它是风轮机叶尖速比(Tip Speed Ratio, TSR) λ 和桨距角 β 的函数. 叶尖速比为叶片的叶尖线速度和风速之比, 可用下式表示:

$$\lambda = \omega_w R_w / v , \quad (5)$$

式中, ω_w 为风轮角速度. 风能利用系数 C_p 与给定的桨距角 β 的关系为: 当桨距角 β 为恒定值时, C_p 的大小与 λ 有关, 此时使 C_p 最大的 λ 值被称为最佳叶尖速比 λ_{opt} .

2.1.3 发电机模型

异步发电机主要由风轮机、传动装置、鼠笼式异步发电机以及桨距控制系统组成. 其中, 风轮机、风速、桨距控制系统可通过风轮机、风源、风

轮机调速器来实现, 并通过异步发电机发电(图 1).

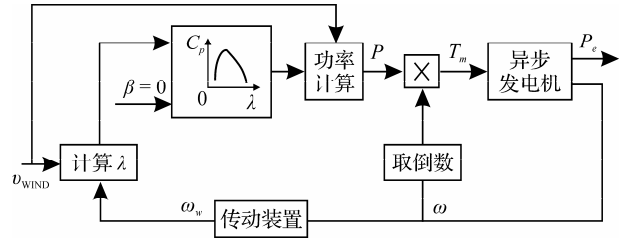


图 1 异步风力发电机模型

异步风力发电机的转速 ω 经过传动装置得到风轮机角速度 ω_w , 再结合风速 v_{WIND} 可以求得叶尖速比 λ , 定桨距风力发电机桨叶桨距角 $\beta = 0$, 根据 $C_p(\lambda, \beta)$ 函数可得风能利用系数 C_p , 然后通过功率计算模块可得风轮机的输出功率. 异步风力发电机运行时, 在输出有功功率的同时, 需要吸收一定的无功功率, 通常配备一定容量的无功补偿电容器来提高其端口的功率因数.

2.2 光伏发电系统建模

2.2.1 光伏阵列模型

文中采用工程用的光伏阵列模型^[9-10], 其中, 重要参数为短路电流 I_{sc} , 开路电压 U_{oc} , 最大功率点电流 I_m 和电压 U_m . 当光伏阵列电压为 U 时, 在考虑太阳辐射和太阳温度影响时, 其对应的参数如下:

$$I'_{sc} = I_{sc} S(1 + \alpha(T - T_{ref})) / S_{ref} , \quad (6)$$

$$U'_{oc} = U_{oc} (1 - \gamma(T - T_{ref})) \ln(1 + \beta(S / S_{ref} - 1)) , \quad (7)$$

$$I'_m = I_m S(1 + \alpha(T - T_{ref})) / S_{ref} , \quad (8)$$

$$U'_m = U_m (1 + \gamma(T - T_{ref})) \ln(1 + \beta(S / S_{ref} - 1)) , \quad (9)$$

$$C_2 = (U'_m / U'_{oc} - 1) (\ln(1 - I'_m / I'_{sc}))^{-1} , \quad (10)$$

$$C_1 = (1 - I'_m / I'_{sc}) \exp(-U'_m / C_2 U'_{oc}) , \quad (11)$$

$$I = I'_{sc} (1 - C_1 (\exp(U / C_2 U'_{oc}) - 1)) , \quad (12)$$

$$P = UI , \quad (13)$$

式中: 假定输出特性曲线基本形状不变, 系数 α , β, γ 典型值为 $\alpha = 0.0025 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.00288 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2.2.2 光伏发电系统结构

图 2 所示为光伏发电系统结构. 光伏发电单元由光伏阵列、前级 DC/DC 变换器、直流电容、后级 DC/AC 逆变器以及 LC 滤波电路组成. 可见光伏阵列在光照强度 Rad 和温度 Temp 下输出电压和电流, Boost 变换器完成直流侧光伏阵列输出电压的升压功能以及系统的最大功率点跟踪(Maximum

Power Point Tracking, MPPT), 后级 DC/AC 完成直流至交流的逆变功能, 带小电阻的 LC 滤波电路, 能有效地滤除高次谐波以及防止电路振荡。

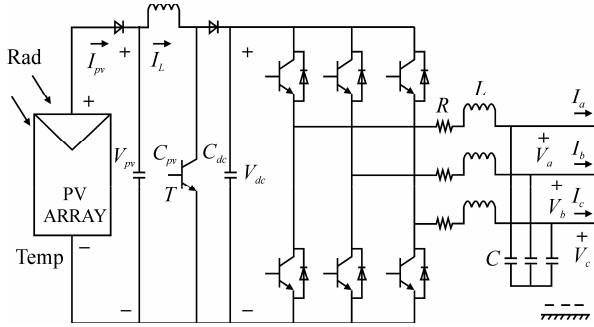


图2 光伏发电系统结构

2.3 蓄电池系统建模

2.3.1 蓄电池组模型

蓄电池储能系统(BESS)主要由蓄电池组、四象限变流器和充放电控制装置组成, 可以实现输出有功功率(\$P\$)和输出无功功率(\$Q\$)、吸收有功功率(\$P\$)和输出无功功率(\$Q\$)、吸收有功功率(\$P\$)和吸收无功功率(\$Q\$)、输出有功功率(\$P\$)和吸收无功功率(\$Q\$)等4种运行状态。BESS 可以等效为蓄电池组模型和四象限运行变流器模型两部分(图3)。

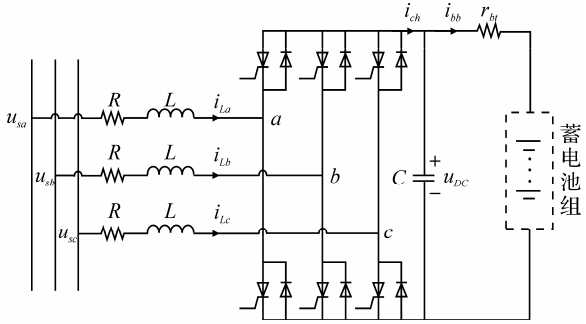


图3 蓄电池储能系统结构

蓄电池组模型由1个受控电压源和1个定值内阻组成^[11], 其表达式为:

$$E_b = E_0 - R_b i_b - K \frac{Q_b}{Q_b - \int_0^t i_b dt} + A \exp(-B \int_0^t i_b dt), \quad (14)$$

式中, \$R_b\$ 为蓄电池内阻; \$i_b\$ 为蓄电池输出电流; \$A\$ 为指数区域幅值; \$B\$ 是指数区域时间常数的倒数; \$K\$ 为极化电压; \$Q_b\$ 为蓄电池的容量, Ah; \$E_b\$ 为蓄电池的空载电压; \$E_0\$ 为蓄电池的恒定电压。

2.3.2 四象限运行变流器模型

利用四象限运行变流器的能量双向流动特性

可实现交流系统与直流侧的蓄电池组之间的能量交换, 考虑到变流器开关变换过程迅速, 可采用不计调制波频率动态变化过程的四象限运行变流器系统数学模型^[12-13]。参照图3的电流方向, 并根据基尔霍夫电流和电压定律, 可以得到三相静止 \$abc\$ 坐标系下电压、电流关系方程为:

$$\begin{cases} L di_a / dt + Ri_a + E_a = E_{sa}, \\ L di_b / dt + Ri_b + E_b = E_{sb}, \\ L di_c / dt + Ri_c + E_c = E_{sc}, \end{cases} \quad (15)$$

式中: \$E_{sa}, E_{sb}, E_{sc}\$ 为外部交流系统的三相电压; \$i_a, i_b, i_c\$ 为交流系统的三相电流; \$E_a, E_b, E_c\$ 分别为变流器交流侧的三相电压。

根据派克变换关系, 可得变流器在 \$dq\$ 同步旋转坐标系(\$d\$ 轴与交流系统电压矢量重合, \$q\$ 轴超前 \$d\$ 轴 \$90^\circ\$)下的数学模型为:

$$\begin{cases} L di_d / dt = E_{sd} + L \omega i_q - m_d U_{dc} - Ri_d, \\ L di_q / dt = E_{sq} + L \omega i_d - m_q U_{dc} - Ri_q, \\ Cd U_{dc} / dt = m_d i_d + m_q i_q - i_o, \end{cases} \quad (16)$$

式中: \$\omega\$ 为交流系统相电压的角频率; \$E_{sd}\$ 为交流系统电压矢量的 \$d\$ 轴分量; \$E_{sq}\$ 为交流系统电压矢量的 \$q\$ 轴分量; \$i_d, i_q\$ 分别为交流系统电流矢量的 \$d\$ 轴和 \$q\$ 轴分量; \$U_{dc}\$ 为电池系统直流侧电压; \$m_q, m_d\$ 为变流器开关函数的 \$d\$ 轴和 \$q\$ 轴分量。

四象限运行变流器采用前端解耦 \$P-Q\$ 控制方式, 可以实现分布式电源与大电网的能量双向流动。光伏、风力等分布式电源一般采用最大功率并网, 这样可以获得可再生能源的最大利用率。四象限运行变流器前端解耦 \$P-Q\$ 控制如图4所示。

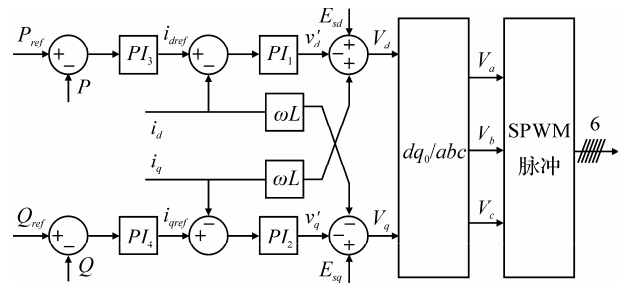


图4 BESS 的变流器控制结构

对于三相平衡系统采用等功率变换后, 四象限运行变流器输出的有功功率、无功功率的数学表达式为:

$$\begin{cases} P = E_{sd} i_d, \\ Q = -E_{sd} i_q, \end{cases} \quad (17)$$

此时,有功功率的大小与 i_d 成正比关系,而无功功率的大小则与 i_q 成反比关系.因此,可以通过对 i_d 和 i_q 的控制来实现对四象限运行变流器输出的有功功率和无功功率的控制.

四象限运行变流器的电流参考值可以根据功率参考值确定,即:

$$\begin{cases} i_{dref} = P_{dref} / E_{sd} \\ i_{qref} = -Q_{dref} / E_{sd} \end{cases} \quad (18)$$

3 风储发电系统电能质量分析

3.1 风储发电系统结构

为验证蓄电池对风力发电系统平抑功率波动和改善电能质量所起到作用,在PSCAD/EMTDC建立仿真模型(图5),分析并网点(PCC)的功率输出情况,并对电能质量进行分析.

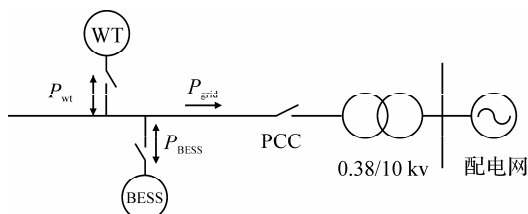


图5 风储发电系统结构

3.2 风储系统仿真及电能质量分析

本系统中风力发电机额定输出功率为300 kW,额定风速为 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.仿真采用的风速样本来源于PSCAD自带的风速数据.设置蓄电池储能系统有功控制器的参考值为50 kW.

图6为用于仿真的风速波形,图7为风力发电功率及并网点的功率变化.从图7可看出,风电场输出功率在18~119 kW区间波动,经储能系统平抑后,并网点输出的功率范围为33~47 kW,波动幅度明显减小.

对并网风储发电系统的电能质量分析结果见表1.根据仿真数据,对电流进行频谱分析,并根据(1)式和(2)式,计算风力发电系统电流波形畸变情况.由表1可知,经储能系统平抑后,风力发电系统的谐波畸变情况显著降低.

4 光储发电系统电能质量分析

4.1 光储发电系统结构

为验证蓄电池对光伏发电系统平抑功率波动

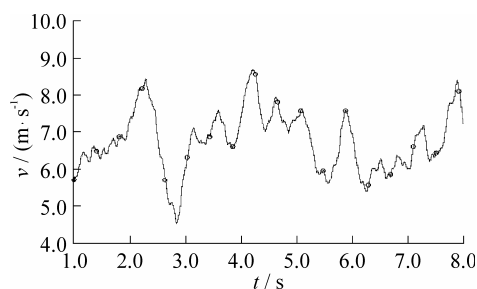


图6 仿真用风速信号

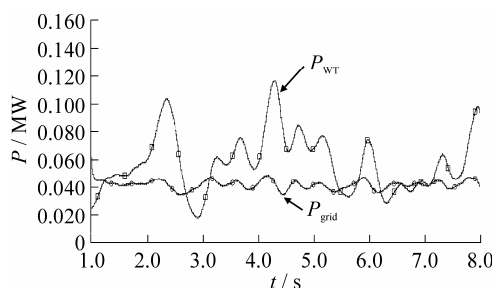


图7 风力及并网点功率波形

表1 风力发电系统电流波形畸变情况 %

谐波指标	风电接入	风储发电系统
总谐波畸变率	4.6044	1.8692
三次谐波含有率	0.8624	0.2568
五次谐波含有率	2.2274	1.5327
七次谐波含有率	1.0755	1.0659

和改善电能质量所起到作用,在PSCAD/EMTDC建立了的仿真模型(图8),分析并网点(PCC)的功率输出情况,并对电能质量进行分析.

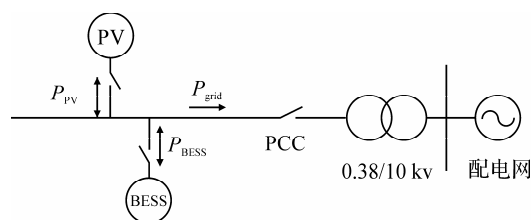


图8 光储发电系统结构图

4.2 光储系统仿真及电能质量分析

系统采用光伏在 $T = 25^\circ\text{C}$, $S = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 标况下的功率为200 kW.光伏采用的光照强度数据来源于杭州电子科技大学微电网实验室2012年11月19号气象数据,该数据为上午9点到下午5点的光照强度值,每分钟取1个数据,样本共取480个光照强度值.设置蓄电池储能系统有功控制器的参考值为50 kW.

图9为光储发电系统模型仿真的光照强度,图

10 为光伏发电功率及并网点功率变化。从图 10 可看出,光伏电站输出功率在 0~99 kW 区间波动,波动幅度非常大;经储能系统平抑后,并网点输出的功率范围为 37~43 kW,波动幅度显著降低。

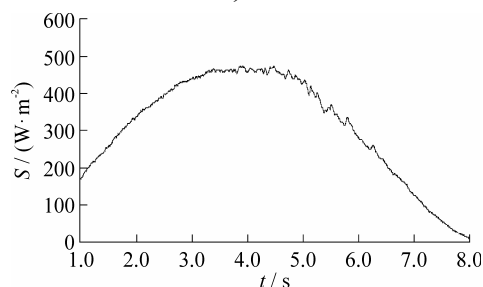


图9 光照强度变化曲线

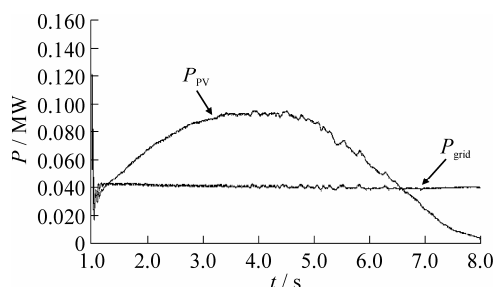


图10 光伏及并网点功率波形

对并网光伏发电系统的电能质量分析结果见表 2。根据仿真数据,对电流进行频谱分析,并根据(1)式和(2)式,计算风力发电系统电流波形畸变情况。由表 2 可知,经储能系统平抑后,风力发电系统的谐波畸变情况显著降低。

表2 光伏发电系统电流波形畸变情况 %

谐波指标	光伏接入	光储发电系统
总谐波畸变率	5.1396	3.0136
三次谐波含有率	1.8270	0.5982
五次谐波含有率	2.1141	1.7341
七次谐波含有率	1.7682	1.2683

5 风光储发电系统电能质量分析

5.1 风光储发电系统结构

为验证蓄电池对风光发电系统平抑功率波动

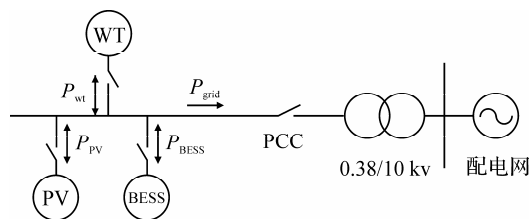


图11 风光储发电系统结构图

和改善电能质量所起的作用,在 PSCAD/EMTDC 建立了的仿真模型(图 11),分析并网点(PCC)的功率输出情况,并对电能质量进行分析。

5.2 风光储系统仿真及电能质量分析

仿真中风力发电机额定输出功率为 300 kW,额定风速为 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。光伏在 $T = 25^\circ\text{C}$, $S = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 标况下的功率为 200 kW。仿真采用与前文相同的风速数据样本和光照强度数据样本。设置蓄电池储能系统有功控制器的参考值为 120 kW。

风光储发电系统模型仿真结果如图 12 所示。图 12(a)为风光储发电系统有功功率波形,为更直观地反映出 BESS 在系统的作用,将风力发电和光伏发电功率总变化看作系统总的功率波动 P_{TOTAL} ,变换后的功率波形图即为图 12(b)。从仿真结果可知,风力与光伏总的功率波动为 40~192 kW,蓄电池储能系统的功率波动范围在 -75~80 kW,并网点的功率波动范围在 112~126 kW,在仿真时间内最大波动率为 2.8%。因此,可以得出结论:在风力、光伏功率波动的情况下,蓄电池储能系统很好地抑制了这种波动,且从并网点的平稳功率潮流可以得到验证。

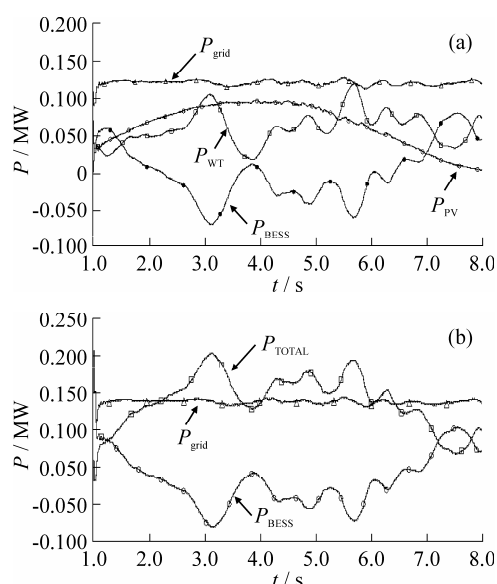


图12 风光储发电系统功率波形

对风光储发电系统的电能质量分析:总谐波畸变率为 2.0329%,三次谐波含有率为 0.4862%,五次谐波含有率为 1.3965%,七次谐波含有率为 0.8237%。可见,电流总谐波畸变率为 2.0329%,小于 5%,奇次谐波电流含有率小于 4%,符合《电能

质量公用电网谐波》(GB/T14529-93)要求。

从上述的结果可见,在间歇式能源供电系统中,加入储能装置能够提高系统的稳定性,在间歇式电源波动性较快和较大的情况下,能量存储也能使系统运行在一个稳定的输出水平;储能装置还能够抑制分布式电源输出的功率波动,减少对大电网的冲击,改善电能质量。

6 结论

在风力发电、光伏发电和蓄电池储能系统模型基础上,构建了并网型风电/储能、光伏/储能、风电/光伏/储能三类系统的仿真模型。蓄电池储能系统采用 PQ 解耦控制策略,能够快速实现功率的双向流动,平滑系统的输出功率曲线,提高系统的稳定性与可靠性,改善电能质量。并且通过仿真结果及电能质量分析验证了该系统组合的可行性和有效性,为分布式能源发电系统的实际应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 国家电网公司.《风光储输示范工程关键技术研究》国家科技支撑计划可行性论证报告[R].北京:国家电网公司,2010.
- [2] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等.大规模风电接入电网相关问题及措施[J].中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
- [3] 王一波,许洪华.基于机会约束规划并网光伏电站极限容量研究[J].中国电机工程学报,2010,30(22):22-28.
- [4] 陈建军.风力发电并网对电力系统电能质量的影响分析[J].华北电力技术,2010(5):10-13.
- [5] 桑姐.小型光伏发电系统并网对电网的影响[J].上海电力,2008(2):132-134.
- [6] 刘杨华,吴政球,涂有庆,等.分布式发电及其并网技术综述[J].电网技术,2008,32(15):71-76.
- [7] 李斌,刘天琪,李兴源.分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J].电网技术,2009,33(3):84-88.
- [8] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J].电网技术,2008,32(7):1-9.
- [9] 吴忠军,刘国海,廖志凌.硅太阳阵列工程用数学模型参数的优化设计[J].电源世界,2007,31(11):87-90.
- [10] 赵晶.带有 MPPT 功能的光伏矩阵仿真模型[J].厦门理工学院学报,2008,16(3):53-56.
- [11] Tremblay O, Dessaint L A, Dekkiche A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C]. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007:284-289.
- [12] 张桂斌,徐政,王广柱.基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J].中国电机工程学报,2002,22(1):17-22.
- [13] Lee D C, Lee G M, Lee K D. DC-bus voltage control of three-phase AC/DC PWM converters using feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1):826-833.

Effect Analysis of Battery Energy Storage System on Output of Distributed Power Generation System with Wind Turbine and Photovoltaic in Grid-connection

LI Jiu-guang¹, LIU Shi-rong^{1*}, NING Kang-hong², ZHOU Xiao-bo², ZOU Luo-jian¹

(1.School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2.Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: To solve the problem of voltage fluctuation and compromised power supply caused by the unsteady wind turbine and photovoltaic power output, we propose using the energy storage systems to improve stability of the power output and the power quality of the grid-network. The indirect combination modeling method is employed to establish the models of typical wind generator, photovoltaic generation and battery energy storage by PSCAD/EMTDC, based on which the Wind-Battery generation system model, solar-battery generation system model and wind-solar-battery hybrid generation system model in grid-connection are built. The simulations show that the power stability and the quality of the intermittent energy output can be improved using the proposed method.

Key words: wind generation; photovoltaic; BESS; distributed generation; power quality

(责任编辑 章践立)