集成嵌入式储能的双馈风力发电系统功率控制

贾俊川,刘晋,张一工

(华北电力大学电气与电子工程学院,北京市 102206)

摘要:风能输出功率的波动性和间歇性源于原动力风的自然特性,其接入系统会给电网稳定性和 电能质量带来不利的影响。结合双馈发电系统采用背靠背变流器且具有直流母线的特点,提出一 种基于嵌入式能量存储系统抑制风电出力波动的控制方法。该储能系统不仅电气上可嵌入双馈系 统直流侧,而且物理上也可嵌入实际系统,其灵活的功率吞吐能力可依据风速变化补偿双馈发电系 统输入电网的功率波动。设计了相应的控制策略,通过经典风力四分量模型和电网电压降落的仿 真算例,对集成嵌入式能量存储的双馈发电系统的运行特性进行了仿真。仿真结果表明,所提出的 拓扑结构和功率控制策略能够很好地改善并网风力发电系统的电能质量和稳定性。

关键词:嵌入式能量存储;风力发电;双馈电机;功率波动抑制;功率控制

0 引言

随着能源和环境问题的日益严峻,作为可再生 能源的风力发电得到了广泛关注和大力发展。风电 并网是实现风能大规模利用的有效方式,随着风力 发电机组容量和规模的不断扩大,其在电网中所占 的比重逐步提高,对电力系统的影响也将越来越显 著。

风的随机波动性和间歇性决定了风电场的输出 功率也具有随机波动性和间歇性,风电的出力可靠 性差,与电力系统需要实时平衡稳定的特性相悖,其 在电网中运行势必会对电网产生一系列影响,在风 电穿透功率较大的电网中,风电机组的稳定、可靠运 行显得尤为重要。文献[1-2]基于风能资源季节分 布与水能资源互补的特点,提出风水互补的运行方 式,用水电调节风电。文献[3]通过具有快速启停和 负荷调节特性的燃气轮机电站补偿风电场出力的波 动。但常规能源由于地理上的局限,不具有普遍的 可获得性。文献[4]利用转子惯性存储部分动能,这 种方式下,系统只在某些设定点能够抑制较小功率 波动,而且效率较低。文献[5]引入储能装置与风力 发电系统相结合,由储能系统调节风电输出功率。 由于储能系统具有普遍可获得性,且对任何风速和 运行点都可以进行补偿,因此有可能被广泛采用。

结合储能系统来研究改善风能发电的稳定性, 提高发电及接入系统的稳定运行成为风电并网运行 中的重要问题。文献[6]采用飞轮储能装置平滑风 力发电功率,文献[7]使用超导储能系统,文献[8]中 超级电容器承担平滑功率的作用。然而,飞轮储能 系统一般损耗高,控制系统相对复杂;超导储能安装 和维护费用较大;超级电容器则常用于秒级储能,不 适合实际兆瓦级使用,而电池储能系统(BESS)成本 低,技术成熟,是电力系统中最实用化的储能系 统^[9]。文献[10]通过对各种储能装置拓扑比较分 析,指出电池储能系统因存储容量和功率密度高,适 用于风力发电系统储能。

本文利用嵌入式能量存储(embedded energy storage,EES)电池系统,探讨一种抑制风电输出功 率波动的可行方案,使风电场具有灵活可控的电能, 对提高电网吸纳风电的能力及电网和风电场的稳定 运行都具有重要意义。

1 集成 EES 的双馈风力发电系统

双馈风力发电系统的结构见附录 A 图 A1,其 定子绕组直接与电网相连,转子绕组则通过由网侧 换流器(GSC)和转子侧变流器(RSC)构成的背靠背 脉宽调制(PWM)变流器接入电网。由附录 A 图 A1 可见,其直流母线的存在以及电压源型变流 器的采用,使得双馈发电系统非常容易在直流端嵌 入储能系统^[11-13]。

图 1 中 EES 通过 Boost DC/DC 接入直流母 线。由图可见,集成 EES 的成本仅源于储能装置自 身,而无需附加 AC/DC 或 DC/AC 装置,节省了传 统储能系统中一套专用变流器的成本;另一方面, EES 不仅电气上可嵌入发电系统,而且可以在物理 空间上嵌入^[12],储能装置可放置在风力机塔筒的内 部中空部分,不需要额外的储能室和相应的建筑占 地面积,在经济灵活性和安全可靠性方面具有优势。

收稿日期: 2010-03-17; 修回日期: 2010-05-13。



2 集成 EES 的双馈风力发电系统控制策略

风的自然间歇性使风力发电功率稳定性较差, 其输出功率随风速增大或减小。可利用储能系统对 此波动功率进行补偿,以实现输入电网功率恒定。 因此,EES 需具备一定的能量缓冲水平。为保障储 能系统的自身安全和正常工作,运行中需实时检测 EES 的储能状态或称为荷电状态(SOC)。SOC 定 义为电池剩余电量与标称电量的比值,对电池的充 放电过程至关重要,需设定在一定的范围内。SOC 不易直接获得,可简化地通过检测电池端电压 u_{eee} 实现^[13]。附录 B 为一简化电池模型^[14]电压与 SOC 的关系及发电系统控制策略切换机制。

2.1 SOC 未越限时的控制策略

电池的 SOC 处于工作范围(如 20%~80%)内 时,EES 作为能量缓冲系统由 Boost DC/DC 变流器 接入发电系统的直流母线侧,根据风速变化调节发 电系统输出功率。在传统双馈发电系统中,直流环 节的电压波动在一定程度上反映了风电功率的波 动,因此,直流侧 DC/DC 以恒定的直流母线电压为 控制目标。当直流侧电压高于设定值时,表明风速 较高,过剩的风能可通过 DC/DC 变流器向 EES 充 电;反之,当直流侧电压低于设定值时,表明风速较 低,风电输入电网功率的缺额则由 EES 通过 DC/ DC 变流器放电而流入直流母线侧。

RSC 实现风力发电机输出有功与无功功率的 解耦控制。为实现最大风能捕获,根据风速实时调 节发电机的转速,保持最佳叶尖速比,最大化风能转 换效率;无功功率的参考值可根据定子功率因数的 需求选取。

由于 DC/DC 用于控制直流母线电压,GSC 则 补偿发电机定子侧的输出功率与风电输入电网功率 指令的差额功率,保证输入电网的功率恒定,提高风 电输出功率的稳定性。为充分利用变流器的无功调 节能力,可根据系统的需要提供或吸收一定的无功 功率,其参考值可依据网侧的功率因数选择(通常工 作于单位功率因数);另外,在电网电压降落情况下, 无功功率可用于调节系统交流电压的稳定,其最大 补偿容量取决于变流器的设置容量。 各部分变流器及集成 EES 的双馈发电系统的 总体控制框图见图 2。图中, P_{gsc}^{*} , P_{gsc} , Q_{gsc}^{*} , Q_{gsc} , i_{d}^{*} , i_{d} , i_{q}^{*} , i_{q} 分别为 GSC 有功、无功功率及 d轴、q轴电 流参考值和实际值; P_{opt}^{*} , P_{s} , Q_{s}^{*} , Q_{s} , i_{rd}^{*} , i_{rd} , i_{rq}^{*} , i_{rq} 对 应 RSC 有功、无功功率及 d轴、q轴电流参考值及 实际值; u_{dc}^{*} 和 u_{dc} 分别为直流侧电压参考值和实际 值; P_{g}^{*} 为风电系统输入电网功率指令; ω_{r} 和 v分别 为电机转速和风速;DFIG 为双馈感应发电机。





2.2 SOC 越限时的控制策略

某段时间内风速持续较高(如暴风),可能使得 EES存储容量达到上限饱和;某段时间内风速持续 较低(如无风),又会使得 EES存储容量低于下限而 深度放电。对于由蓄电池构成的储能系统,必须避 免过充或深放状态的出现。因此,为保证 EES 的安 全及发电系统的正常运行,如图 2 所示,当检测到电 池 SOC 或电压越限时,必须将储能系统切除。

此时,系统恢复为传统的双馈发电系统,总体控制策略须进行相应调整。在切除储能环节后的高风速区(额定风速以上),RSC实现恒功率控制,在低风速区(额定风速以下)依然跟踪最大功率曲线;GSC则恢复为控制直流端电压恒定,保证系统的可靠运行。EES退出后的总体控制框图见附录C图C1。

3 仿真算例

为了验证所述算法以及 EES 平抑风能功率波

动的效果,着重对额定风速下的最大风能捕获区进 行以下算例验证。

其中,双馈发电机为 1.5 MW,基本风速为 8 m/s,对应的风电输入电网功率参考值为 0.4(标 幺值),其基准值为 1.5 MW。仿真风速在 4 m/s~ 12 m/s 范围内变化时,风力系统输入电网的功率在 0.2~0.6(标幺值)波动。因此可选择嵌入式储能系统的功率为 0.2(标幺值),即 0.3 MW(储能系统的 功率及容量选取依据见附录 D)。风电功率波动主 要是分钟级时间尺度,可简单计算求得 10 min 跨度

的 EES 容量为 50 kW・h。

3.1 各种模拟风况下 EES 功率控制的仿真结果

风力机是风力发电机组的原动力,风电功率取 决于风速。为描述风的随机性和间歇性引起的功率 波动特性,采用国内外常用的风力四分量模型^[15], 即基本风、阵风、渐变风和随机风。图 3 所示为 5 min 时段内风速属性,从上至下依次为基本风+ 阶跃、基本风+渐变风、基本风+阵风和基本风+随 机风情况,其中最大风速均不超过 12 m/s。定义 EES 的充电功率为负,放电功率为正。





由图 3 仿真结果可见,当风速在一定范围内变 化时,除了在快速变化的随机风速下具有较小跟踪 误差外,集成 EES 的双馈风力发电系统均能保持风 电输出功率快速跟踪功率指令,且使其保持恒定。 增大 EES 的容量可进一步减小跟踪误差。仿真结 果表明,EES 具有灵活、快速的功率吞吐能力,能有 效抑制风电输出功率的波动。

3.2 风电系统总输出功率指令改变时的分析

同一风速下,在仿真中第 300 s,风电系统总输 出功率指令由 0.35 突变为 0.55(标幺值)。由图 4 可见,结合 EES 协调控制,风电系统输出功率能够 快速跟踪指令值,在 EES 容量配置合适的情况下, 可使风力发电机组成为灵活可控、可预测的电源。



图 4 风电系统输出功率指令变化时的功率曲线 Fig. 4 Power curves with wind power reference changed

3.3 电网电压扰动时的分析

当电网由于短路故障等原因发生电压降落时, 风电输入到电网的功率下降,而原动力功率基本不 变,功率的不平衡将导致发电机转子的加速,而且可 能导致直流母线过电压,给电网及风力发电系统的 安全运行带来潜在的威胁。

基于风电并网导则,在干扰期间,风力发电机组 需保持与系统连接,以限制局部母线上的冲击,加快 故障清除后系统的恢复。此时可借助 EES 的功率 补偿能力提高系统的稳定性。图 5 为仿真结果,在 仿真第 2 s 系统电压出现扰动,2.3 s 时切除故障。



图 5 扰动期间的响应能力 Fig. 5 Response ability to disturbance

如图 5(a)所示,在扰动期间,EES 稳定直流端 电压,帮助 GSC 向电网提供无功补偿,以支撑扰动 期间接入点的电压水平,其支撑能力与变流器容量 有关。另外,在故障期间,EES 吸收多余的能量,限 制了发电机的加速度,使其转速升高范围有限,见 图 5(b);结合 DC/DC 的控制,使直流电压保持恒 定,有利于保护电力电子变换器,大大提高了双馈机 组的低电压穿越能力^[15];而且当故障被切除后, EES 能够快速将故障期间所存储的能量输出给电 网,有利于系统电压的恢复,使为重新建立系统连接 的瞬态过程缩减到最短^[16]。

4 结论

风电功率波动源于源动力——自然风的间歇性 和随机性,为保证风电并网的稳定运行,本文采用嵌 入式储能系统来调节风电功率,通过 EES 的协调, 不仅有效地减小了对电网的冲击和影响,提高了风 电出力的可用性,还可降低电力系统的备用容量,提 高电力系统接纳风电的能力。本文得到以下结论:

1) EES 的功率调节作用,能够有效抑制双馈风

电系统输入电网的功率波动,使其输出平滑功率,提 高了风能出力的可靠性;

2)当电网发电计划或运行方式改变时,即使在 风速不变的情况下,安装 EES 的双馈发电系统也能 够快速跟踪变化功率指令,使风能资源成为可调可 控的电源,便于电网规划和调度安排;

3)当系统电压故障时,EES的功率补偿能力能 够抑制发电机的加速度和速度上升,EES+DFIG的 运行模式使双馈发电机的低电压穿越能力得到了增强,提高了系统的稳定运行能力。

附录见本刊网络版(http://aeps. sgepri. sgcc. com. cn/aeps/ch/index. aspx)。

参考文献

[1] 王平洋. 西电开发与绿色电网. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 1-2.

WANG Pingyang. Development of power in the west and green network. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 1-2.

- [2] 刘惠敏,王世峰,刘伟,等.风水互补发电系统优化设计初探.水 力发电,2007,33(3):77-79.
 LIU Huimin, WANG Shifeng, LIU Wei, et al. Discussions on the optimum design of hydro-wind synergy power station. Water Power, 2007, 33(3): 77-79.
- [3]包能胜.风电-燃气轮机互补发电系统若干关键问题的研究[D]. 北京:清华大学,2007.
- [4] LUU T, ABEDINI A, NASIRI A. Power smoothing of doubly fed induction generator wind turbines// Proceedings of the 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 10-13, 2008, Orlando, FL, USA: 2365-2370.
- [5] LU M S, CHANG C L, LEE W J, et al. Combining the wind power generation system with energy storage equipments// Proceedings of 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 5-9, 2008, Edmonton, Canada: 1-6.
- [6] CARDENAS R, PENA R, ASHER G, et al. Power smoothing in wind generation systems using a sensorless vector controlled induction machine driving a flywheel. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(1): 206-216.
- [7] 刘昌金,胡长生,李霄,等. 基于超导储能系统的风电场功率控制系统设计. 电力系统自动化,2008,32(16):83-88.
 LIU Changjin, HU Changsheng, LI Xiao, et al. Design of SMES control system for smoothing power fluctuations in wind farms. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 83-88.
- [8] 李霄,胡长生,刘昌金,等.基于超级电容储能的风电场功率调节 系统建模与控制.电力系统自动化,2009,33(9):86-90.
 LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin, et al. Modelling and controlling of SCES based wind farm power regulation system.
 Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 86-90.
- [9] MUYEEN S M, ALI M H, TAKAHASHI R, et al. Wind generator output power smoothing and terminal voltage regulation by using STATCOM/ESS// Proceedings of 2007 IEEE Power Technology Conference, July 1-5, 2007,

Lausanne, Switzerland: 1232-1237.

- [10] SPAHIC E, BALZER G, HELLMICH B, et al. Wind energy storage-possibilities// Proceedings of 2007 IEEE Power Technology Conference, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: 615-620.
- [11] YANG T C. Initial study of using rechargeable batteries in wind power generation with variable speed induction generators. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(2): 89-101.
- [12] YANG T C. A novel design to enable higher penetration of wind power// Proceedings of European Offshore Wind Conference & Exhibition, December 4-6, 2007, Berlin, Germany.
- [13] ABBEY C, JOOS G. Integration of energy storage with a doubly-fed induction machine for wind power applications// Proceedings of 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 1964-1968.

- [14] WANG X Y, MAHINDA V D, CHOI S S. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(3), 868-878.
- [15] 隋红霞. 双馈风力发电机组接入电网特性研究[D]. 沈阳:沈阳 工业大学,2008.
- [16] ABBEY C, JOOS G. Short-term energy storage for wind energy applications// Proceedings of 2005 IEEE Industry Applications Conference Fortieth IAS Annual Meeting, October 2-6, 2005, Hong Kong, China: 2035-2042.

贾俊川(1983—),男,通信作者,博士研究生,主要研究 方向:电力系统分析、运行与控制以及风力发电技术。 E-mail: jiajunchuan@126. com

刘 晋(1974—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向: 风力发电技术、电力电子技术在电力系统中的应用。

张一工(1955—),男,教授,主要研究方向:风力发电技 术、无功补偿、电力电子技术在电力系统中的应用。

Power Control of DFIG Based Wind Power System Incorporated with Embedded Energy Storage

JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong (North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Fluctuation and intermittence are the characteristics of wind energy, which originate from the natural feature of wind. With this variable power flowing into grid, the grid stability and power quality would be impacted. Because doubly-fed induction generator (DFIG) based wind system adopts two back-to-back voltage source converters and a DC bus, a power control method is proposed based on embedded energy storage (EES) system to smooth short-term fluctuations in the wind farm output. Not only can the EES be embedded into the DC side of DFIG electrically, but also can insert the DFIG physically. Taking the natural characteristic of wind into consideration, EES is capable to damp the fluctuant power into grid with its flexible power handling capability. The corresponding control strategy is designed. Taking the classical four-component wind model and grid voltage disturbance condition for example, the operational characteristic of DFIG based wind power system incorporating EES is simulated. Simulation results show that the power quality and stability of wind system connected to power grid can be improved by embedded energy storage.

Key words: embedded energy storage; wind power generation; doubly-fed induction generator (DFIG); fluctuations damping; power control

附录 A



附录 B

1)图 B1 为一简化的三阶电池模型^[14],图中, E_m 为电池内电势, R_0 , R_1 和 R_2 均代表内阻。电池电 压与 SOC 有如下关系:

$$E_m = E_{m0} - K_E \left(273 + \theta\right) \left(1 - S_{\text{soc}}\right) \tag{B1}$$

对特定的电池, E_{m0} 和 K_E 为常数, 可通过实验方法确定, θ 为电解液的温度, S_{soc} 为电池荷电状态。



图 B1 电池模型 Fig.B1 Battery model

2)图 B2 为集成 EES 的双馈发电系统控制机制。当电池 SOC 位于上下限之间时,两个比较器输出均为 1,使信号变量 Sig_SOC=2,此时 EES 并入直流侧安全运行,稳定直流电压,抑制功率波动;当 SOC 越限 (饱和或深放)时,总有一个比较器输出为 0,使 Sig_SOC=1,此时 EES 退出直流端,直流环节电压由 GSC 控制实现。





图 C1 EES 退出后双馈发电系统控制框图 Fig.C1 Control frame of DFIG without EES

附录 D

图 A1 中, P_s 为发电系统输入电网的功率,等于 DFIG 定子功率 P_1 与 GSC 输出功率 P_3 之和。 P_2 是 RSC 向转子提供的励磁功率,接入储能系统后,设 P_b 为 EES 吸收(或释放)的功率。

未安装 EES 时,在不计各种损耗且系统稳态情况下有:

$$P_s = P_1 + P_3 = P_1 - P_2 \approx P_1 - sP_1 = P_1(1 - s) = P_m$$
(D1)

由于风力机捕获风能的随机性和波动性,双馈发电系统输入电网的功率也具有波动性。EES 可作为能 量缓冲系统以抑制风电输入电网功率的高频波动,其功率可表示为:

$$P_b = P_1 - P_2 - P_s = P_m - P_s$$
(D2)

式(D2)可以看出,对于恒定的电网功率指令 P_s^* , P_b 将与叶片捕获的功率具有同样的波动规律,其中最大功率 P_{bmax} 对应 EES 的功率水平^[16]。

将 P_b在一定时间段内进行积分,可得到 EES 的容量,同样的,该时间段内 EES 吸收能量的最大值反映 EES 的容量水平。

事实上,由式(D2)可知,伴随不同的电网功率指令 P_s^* , P_{bmax} 和 E_{bmax} 将相应的改变。文献[14]从整个系统成本及效益角度给出了电网功率的确定方法,进而可确定储能系统的容量。由于本文的研究重点为集成 EES 的双馈发电系统的性能,因此仅配合平均风速情况确定。