

基于超级电容器控制策略的含风电微电网电压波动的抑制

陈秋南¹, 韦钢¹, 卢炜², 朱昊¹

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 杭州市电力局, 浙江 杭州 310009)

摘要: 在分析含风电及储能的微电网电压—功率特性基础上, 提出一种基于超级电容器控制策略的电压波动抑制方法, 可对风电功率的随机波动进行快速补偿, 保证风电与超级电容器储能共同向外输出的功率稳定, 实现系统母线电压的稳定控制。对该方法进行了PSCAD仿真, 仿真结果表明: 风速变化时, 该方法可有效抑制风电功率变化引起的电压波动; 大型阻感性负载投入、外部故障时, 该方法亦能减小电压波动和电压恢复时间, 从而验证了所提方法的有效性与可行性。

关键词: 微电网; 风力发电; 电压波动; 优化控制; 超级电容器储能

An approach to suppress voltage fluctuation in micro-grid with wind power based on super capacitor control strategy

CHEN Qiu-nan¹, WEI Gang¹, LU Wei², ZHU Hao¹

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Hangzhou Municipal Electric Power Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: Based on the analysis of voltage-power characteristics of micro-grid with wind power and energy storage, an approach to suppress voltage fluctuation based on the super capacitor control strategy is proposed. It can quickly compensate for random fluctuations of wind power, ensuring the common power of wind power and super capacitor transmitted to the outside steady, thereby achieving the system bus voltage stability control. The PSCAD-based simulation of the proposed method is performed, and simulation results show that when wind speed changes, it can effectively suppress the voltage fluctuation caused by changes in wind power; when large resistive inductive loads are input or the external fault happens, it can also reduce the voltage fluctuation and voltage recovery time, which proves the proposed method is effective and feasible.

Key words: micro-grid; wind power; voltage fluctuation; optimization control; super capacitor energy storage

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)16-0096-07

0 引言

风力发电被认为是目前最具商业价值和规模化开发的新能源, 但风力发电易受风速等外界环境因素影响, 输出功率具有波动性和随机性^[1], 严重影响了风电的电能质量与供电可靠性^[2]。特别, 随风电渗透率的不断提高, 风电对微电网电压质量的影响及其优化控制已成研究热点。

国内外学者就风电引起的微电网电压质量问题进行了大量研究。文献[3-5]分析了风力发电机运行对微电网电压稳定性的影响, 但没有给出相应的电压控

制措施; 文献[6]建立了微网仿真模型, 分析了不同风速下风电运行对系统电压的影响, 并提出利用无功补偿电容器进行电压调节的控制措施^[7]。此外, 文献[8]考虑采用逆变器控制策略控制风力机的运行状态以平衡其输出功率, 但当风速波动较大时其调节能力有限; 更多学者考虑在风机附近安装配套的储能设备平抑风电功率波动^[9-12], 优化微电网的电压质量。目前, 在此领域应用的储能技术包括: 蓄电池、超导储能、飞轮储能以及超级电容器储能等^[13]。由于超级电容器功率密度高、循环寿命长、释放能量速度快^[14], 能够对风电功率波动进行快速补充, 因此本文考虑采用超级电容器储能对微电网电压波动进行优化控制。

本文在分析含风电及储能的微电网电压—功率特性基础上, 提出一种基于超级电容器储能的电

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目(J51303); 上海高等教育“085”工程建设项目; 国家电网公司科技项目(5209311200GW)

压波动优化控制方法, 并在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上构建了相应的微网模型, 通过仿真验证其在风速变化、大型阻感性负载投切、外部故障情况下对电压波动的改善作用。

1 含风电及储能的微电网电压

1.1 含风电及储能的微电网电压—功率特性

含风电及储能的微电网 (Micro-Grid, MG) 如图 1 所示, U_1 为微电网并网处的电网电压, 经一定的传输线路与风电、负荷、储能装置相连接, 连接点处电压为 U_2 。设流入公共节点的功率为正, 流出该节点的功率为负。则 U_1 与 U_2 间电压差为

$$U_2 = U_1 - [R(P_w + P_s - P_{L1} - P_{L2}) + X(Q_w + Q_s + Q_c - Q_{L1} - Q_{L2})] / U_2 \quad (1)$$

由式 (1) 知: 风电输出功率的变化以及负载的投切都会引起电压 U_2 发生变化, 特别微电网系统容量、冗余性及时间常数均较小, 这种输出功率变化以及负载投切均会明显影响系统电压稳定性。

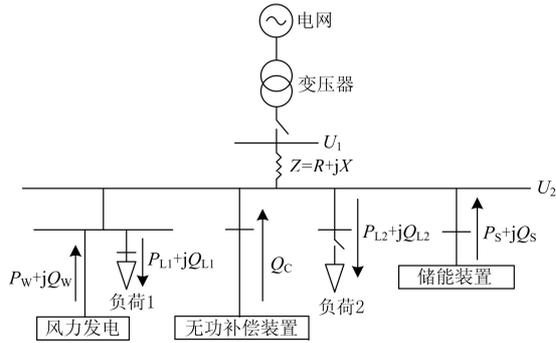


图 1 含风电及储能的微电网示意图

Fig. 1 Diagram of micro-grid with wind power and energy storage

图 1 等效电路中, 假定各负荷、储能装置和无功补偿装置的输出功率不变, 当风速变化引起风电输出功率变化时, 会使线路上产生 Δi 的电流变化, 推知其接入点电压变化为

$$\Delta U = |Z|(\cos\theta + j\sin\theta)|\Delta i|(\cos\varphi + j\sin\varphi) = \frac{|\Delta S|U_2}{S_n}[\cos(\theta + \varphi) + j\sin(\theta + \varphi)] \quad (2)$$

式中: ΔS 为风电输出功率的变化量; S_n 为风电接入点的短路容量; θ 是等值线路阻抗角; φ 为风电功率因数角。忽略 ΔU 的垂直分量, 并考虑线路参数 $R \gg X$, 此时, $\theta \approx 0$, $\sin\theta \approx 0$, $\cos\theta \approx 1$, 则风电接入点电压变化为

$$\Delta U_x = \text{Re}[\Delta U] = \frac{U_2}{S_n}[\Delta P \cos(\theta + \varphi) - \Delta Q \sin(\theta + \varphi)] \approx U_2(\Delta P \cos\varphi - \Delta Q \sin\varphi) / S_n \quad (3)$$

通常风力发电运行于单位功率因数, 由式 (3) 知, 含风电及储能的微电网电压变化主要受风电有功功率的变化和接入点短路容量的影响。特别, 微电网中风电渗透率较高时, 风速改变引起风电输出功率剧烈变化, 极易造成系统母线电压波动; 大型阻感性负载突然投入外部故障时, 功率冲击也会引起母线电压的波动。

本文考虑在风电接入点配置一定的超级电容器储能 (Super Capacitor, SC), 对风速变化引起的风电功率波动进行快速补充, 两者可等效为一个输出功率恒定的电源单元。因超级电容器动态响应特性好, 当风电功率波动时, 其能迅速吞吐功率保证共同向外输送的功率稳定, 从而抑制系统电压波动。

1.2 电压波动优化控制策略

基于 SC 的电压波动优化控制系统如图 2 所示, 风力发电侧连接电容器进行无功补偿, 以保证风力发电的单位因数控制。超级电容器储能系统由三部分组成: 超级电容器储能、双向 DC/DC 变换器和电压源型逆变器 (Voltage Source Inverter, VSI)。超级电容器储能系统经滤波后与风力发电在母线处汇合, 经线路与外电网相连。

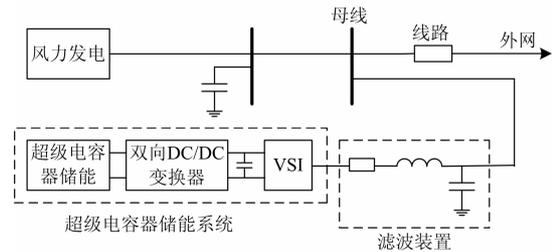


图 2 基于 SC 的电压波动优化控制系统示意图

Fig. 2 Diagram of voltage fluctuation optimization control system based on SC

假定稳态运行时, 风力发电和超级电容器储能系统共同向外电网注入有功功率 P_{ref} 、无功功率 Q_{ref} , 风速变化引起风电有功、无功变化至 P_w 、 Q_w , 此时超级电容器储能需输出的有功、无功为 $P_{\text{ref}} - P_w$ 和 $Q_{\text{ref}} - Q_w$ 。从电网侧观察, 风速扰动时风力发电和超级电容器储能系统共同向外电网注入功率 P_{ref} 、 Q_{ref} 不变, 从而平滑风电功率 (主要是有功功率) 波动, 维持系统母线功率平衡、电压稳定。

2 基于 SC 的电压波动优化控制系统

2.1 超级电容器储能双向 DC/DC 变换器

超级电容器采用等效电容串联等效电阻的模型, 由于超级电容器充放电过程中端电压变化大, 需通过功率变换器接入直流母线, 以便 VSI 向电网输送功率时能够保持恒定的直流母线电压, 故本文

采用如图 3 所示的非隔离型 Buck—Boost 双向功率变换器^[15]。图 3 中, C_{sc} 、 R_s 分别为超级电容器的等效电容和等效电阻; L 、 C 分别为升压电感和滤波电容; S1/D1 和 S2/D2 为可控的功率开关管及其反并二极管, S1 与 S2 采用互补 PWM 控制^[16]; u_{sc} 为超级电容器等效理想电压; V_1 、 V_2 分别为 DC/DC 变换器低、高压侧电压。

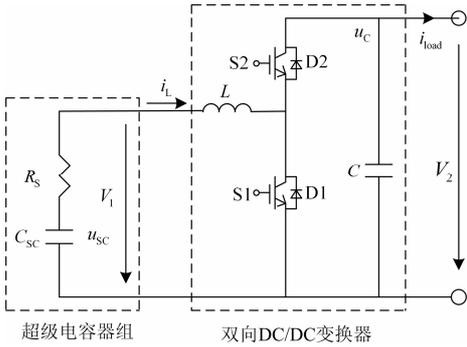


图 3 超级电容器储能双向 DC/DC 变换器

Fig. 3 Bidirectional DC/DC converter of SC energy storage

以电感电流 i_L 和波动的直流母线电压 u_c 为变量, 设 S1/D1 占空比为 d , S2/D2 占空比为 $1-d$, 则当 S1/D1 导通时

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -R_s i_L + u_{sc} \\ C \frac{du_c}{dt} = -i_{load} \end{cases} \quad (4)$$

S2/D2 导通时

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -R_s i_L - u_c + u_{sc} \\ C \frac{du_c}{dt} = i_L - i_{load} \end{cases} \quad (5)$$

利用状态空间平均法可得

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -R_s i_L - (1-d)u_c + u_{sc} \\ C \frac{du_c}{dt} = (1-d)i_L - i_{load} \end{cases} \quad (6)$$

设变量 i_L 、 u_{sc} 、 u_c 对应的稳态分量为 I_L 、 U_{sc} 、 U_c , 由式 (6) 可得

$$I_L = \frac{U_{sc} - (1-D)U_c}{R_s} \quad (7)$$

当 $D > 1 - U_{sc}/U_c$ 时, $I_L > 0$, 超级电容器工作于放电状态; 当 $D < 1 - U_{sc}/U_c$ 时, $I_L < 0$, 超级电容器工作于充电状态。因此, 可通过占空比的调节来控制开关管 S1、S2 的导通与关断, 实现超级电容器的充放电控制。

为实现 DC/DC 变换器低高压侧间的能量双向

流动且保持 VSI 直流侧的电压恒定, 本文双向 DC/DC 变换器采用双 PI 控制, 如图 4 所示。DC/DC 变换器高压侧给定值 V_{ref} 与实测值 V_2 的偏差经 PI 调节器输出高压侧电流控制信号 I_{DC} , 根据直流变换器占空比定义和功率守恒原则得到超级电容器电流参考控制信号 I_{ref} 。电流环中 I_{ref} 与超级电容器实测电流 I_L 之差经 PI 调节器的输出, 通过 PWM 脉宽调制控制开关管 S1、S2 的开关。

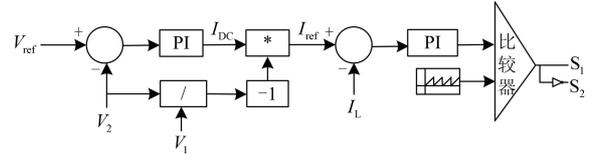


图 4 双向 DC/DC 变换器控制策略

Fig. 4 Bidirectional DC/DC converter control strategy

当风电输出功率大于给定功率时, 超级电容器充电, 此时双向 DC/DC 变换器工作在 Buck 电路模式; 当风电输出功率小于给定功率时, 超级电容器放电, 此时 DC/DC 变换器工作在 Boost 电路模式。

2.2 VSI 模型及其控制

电压源型逆变电路结构如图 5 所示, 图中 V_{dc} 为直流侧电压, 因前级 DC/DC 变换器的控制 V_{dc} 可视为恒定; R 、 L 为 VSI 串联的等效电阻和电感, U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} 为交流电网三相电压。

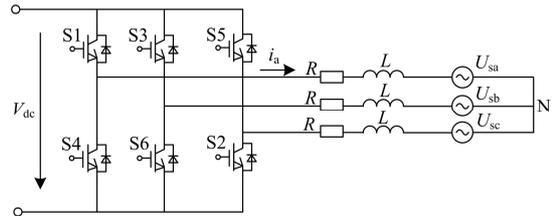


图 5 VSI 电路结构图

Fig. 5 Structure diagram of the VSI circuit

根据基尔霍夫定理和派克变换可得 VSI 同步旋转坐标系下的数学模型^[17], 即

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = V_d - u_{sd} - R i_d + w L i_q \\ L \frac{di_q}{dt} = V_q - u_{sq} - R i_q - w L i_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: w 为交流电网相电压角频率; V_d 、 V_q 分别为 VSI 交流侧电压的 d、q 轴分量; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为交流电网电压 d、q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为 VSI 交流侧电流 d、q 轴分量。

为消除交流电网电压扰动和 d、q 轴间电流耦合, 采用前馈解耦控制, 将与 i_d 、 i_q 具有一阶微分

关系的电压分量 $L \frac{di_d}{dt} + Ri_d$ 和 $L \frac{di_q}{dt} + Ri_q$ 采用比例积分环节来实现, 则式 (8) 可化为

$$\begin{cases} V_d = u_{sd} - wLi_q + \left[k_{p1}(i_{dref} - i_d) + k_{i1} \int (i_{dref} - i_d) dt \right] \\ V_q = u_{sq} + wLi_d + \left[k_{p2}(i_{qref} - i_q) + k_{i2} \int (i_{qref} - i_q) dt \right] \end{cases} \quad (9)$$

根据 VSI 交流侧电流控制原理, 可得图 6 所示的 VSI 控制系统图。VSI 控制系统由电流控制器和功率控制器组成, 功率控制器负责产生有功/无功电流参考值; 电流控制器实现有功/无功电流的解耦, 并结合电压前馈控制产生逆变 PWM 信号。

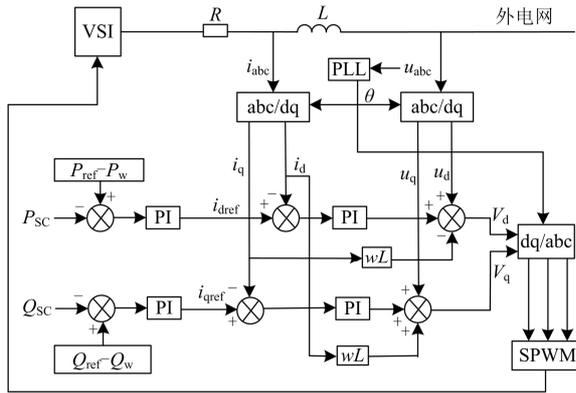


图 6 VSI 控制系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of VSI control system

图 6 中, 外环功率控制产生 d、q 轴参考电流, P_{ref} 、 Q_{ref} 为超级电容器和风力发电共同向外电网注入功率的给定值, P_w 、 Q_w 为风力发电的输出功率, $P_{ref} - P_w$ 和 $Q_{ref} - Q_w$ 即为超级电容器储能系统输出功率的给定值。 P_{sc} 、 Q_{sc} 为超级电容器储能实际的输出功率, 超级电容器储能输出功率给定值与实际值的偏差经 PI 调节后的输出 i_{dref} 、 i_{qref} 即为 d、q 轴电流参考值。内环电流控制 VSI 的输出电流, 将检测到的三相电流、电压经三相静止坐标系到两相旋转坐标系变换, 得到电流、电压的 d、q 轴控制分量 i_d 、 i_q 和 u_d 、 u_q ; 将 d、q 轴参考电流与实际电流 i_d 、 i_q 的偏差经 PI 调节, 再按式 (9) 进行前馈解耦, 得到 VSI 交流侧输出电压 V_d 、 V_q 。最后将两相旋转坐标系变换到三相静止坐标, 经 PWM 调制电路得到 VSI 的驱动信号。

3 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 环境下建立如图 7 所示的含风电及储能的微电网仿真模型, 对所提出的电压波动优化控制方法有效性进行仿真分析, 仿真模型中电力电子器件一律采用理想模型, 且开关频率足够高。图 7 中, 异步风力发电机(Asynchronous Wind

Turbine, AWT)容量为 2 MVA (AWT 采用失速型定桨距控制); 超级电容器储能系统安装在 AWT 出口母线 B1 处, 超级电容器电容 20 F, V_{scmin} 为 200 V, V_{scmax} 为 900 V, 初始电压为 625 V; 微型燃气轮机额定功率为 0.6 MW、0.4 Mvar; 同步发电机额定容量 1 MVA, 功率因数 0.9; 负荷 1: $P_1=0.9$ MW, $Q_1=0.3$ Mvar, 负荷 2: $P_2=0.4$ MW, $Q_2=0.2$ Mvar, 负荷 3: $P_3=0.3$ MW, 负荷 4: $P_4=1.5$ MW, 负荷 5: $P_5=0.2$ MW, $Q_5=0.1$ Mvar; 采用典型低压微网线路参数^[18-19], 线路阻抗为 $(0.642+j0.083)\Omega/km$, 每段线路长度均为 200 m。

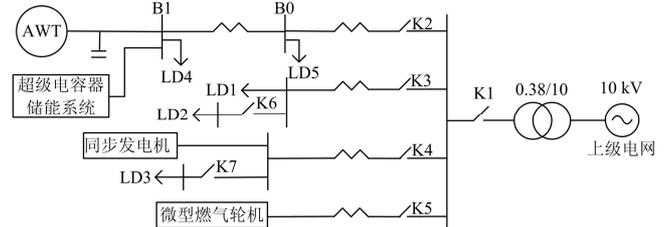


图 7 含风电及储能的微电网系统图

Fig. 7 Diagram of micro-grid system with wind power and energy storage

3.1 AWT 功率波动时的优化仿真

图 7 中 AWT 承担所接入点的大部分负荷, 假定 1.0 s 时风速变为随机风, 如图 8 所示。图 9 为随机风下 AWT 的输出功率, 由图可知: 随机风下 AWT 输出功率变化较大, 该变化直接导致了母线 B1 电压的大幅波动, 如图 10 所示。

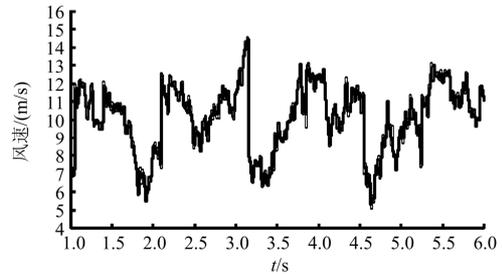


图 8 风速曲线

Fig. 8 Curve of wind speed

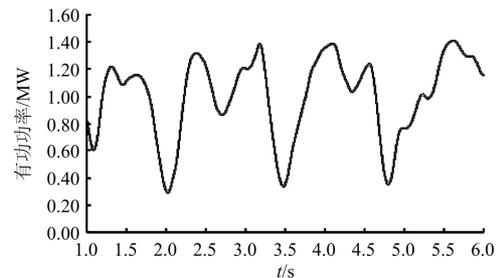


图 9 AWT 输出的功率

Fig. 9 Power output of AWT

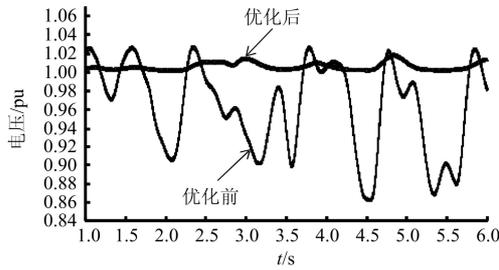


图 10 超级电容器储能优化前后母线 B1 处电压
Fig. 10 Voltage at B1 before and after SC optimization

采用本文所提的电压波动优化控制方法，在母线 B1 处同时投入超级电容器储能对 AWT 功率波动进行优化。由图 10 知：优化后母线 B1 处电压质量较好，电压波动由优化前的 13.8%降低至 1.5%，电压波动优化效果显著。图 11 为优化后超级电容器和 AWT 共同向电网输出的功率，由图看出该功率在 1.5 MW 附近小幅波动，基本维持不变，功率瞬时波动较优化前明显降低。图 12 为超级电容器输出的功率，由图看出风速变化时，超级电容器能迅速响应风电功率变化，对 AWT 功率波动进行及时补偿，动态响应特性较好。

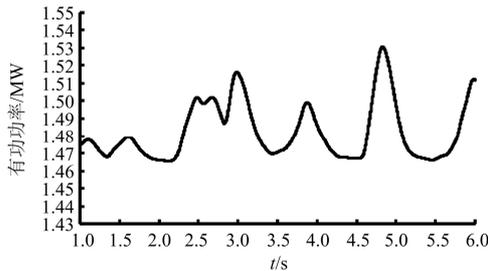


图 11 AWT 和超级电容器共同向外输出的功率
Fig. 11 Common power of AWT and SC transmitted to the outside

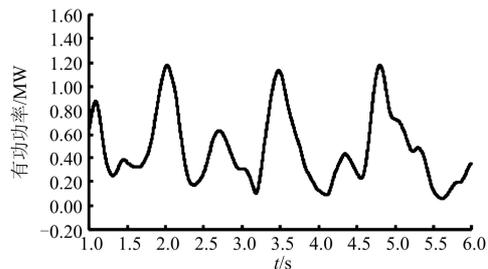


图 12 超级电容器储能输出的功率
Fig. 12 Power output of super capacitor energy storage

3.2 大型阻感性负载投入时的优化仿真

考虑 3.0 s 时在母线 B1 处投入 1 MW+0.5 Mvar 的大型阻感性负载，如图 13 所示，母线 B1 处电压

降落至 0.91；3.5 s 时，再次投入 1 MW+0.5 Mvar 的大型阻感性负载，此时母线 B1 处电压再次跌落至 0.84。由此可见，低压微电网中大型阻感性负载突然投入时，系统电压跌落，极易造成所接入点 AWT 的低电压切机脱网事故。

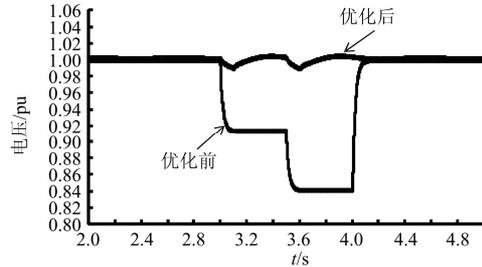


图 13 投入大型阻感性负载后母线 B1 处电压
Fig. 13 Voltage at B1 after adding large resistive inductive loads

在母线 B1 处同时投入超级电容器储能进行优化，优化后母线 B1 处电压如图 13 所示。有超级电容器储能时，当再次投入相同大型阻感性负载时，母线 B1 处电压降落较小，且经约 0.3 s 便恢复到稳态，较优化前电压明显改善。原因在于：大型阻感性负载投入时，超级电容器储能可快速响应，对大型阻感性负载引起的功率缺额进行及时补充，使母线 B1 电压迅速恢复至稳态值。

3.3 外部故障时的优化仿真

3.3.1 A 相接地短路

假定图 7 微网模型 3.0 s 时母线 B0 处发生 A 相接地短路故障，3.1 s 时故障清除，超级电容器储能优化前后母线 B1 处电压变化情况如图 14 所示。

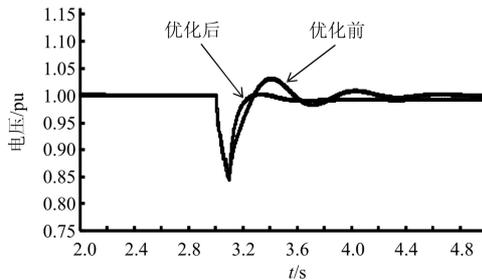


图 14 A 相接地短路时母线 B1 处电压
Fig. 14 Voltage at B1 after A phase ground short circuit

由图 14 知，母线 B0 处发生 A 相接地短路故障时，优化前母线 B1 处电压快速跌落，约经 1.8 s 恢复至稳态；而采用超级电容器储能优化后，母线 B1 处电压恢复到稳态仅需约 0.6 s，且电压超调明显减小，优化效果显著。

3.3.2 三相短路

设图 7 仿真模型 3.0 s 时母线 B0 处发生三相接

地短路故障, 3.1 s 时故障清除, 超级电容器储能优化前后母线 B1 处电压变化如图 15 所示。

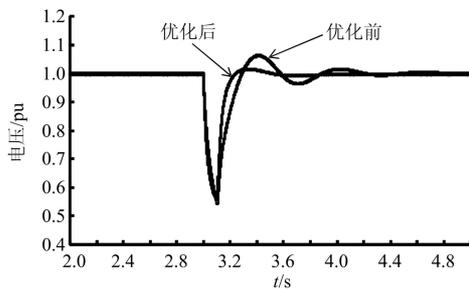


图 15 三相短路时母线 B1 处电压

Fig. 15 Voltage at B1 after three-phase ground fault

由图 15 知, 母线 B0 处发生三相接地短路时, 无超级电容器储能时母线 B1 处电压快速跌落, 约经 1.4 s 恢复至稳态; 而采用超级电容器储能优化后, 母线 B1 处电压恢复到稳态仅需约 0.5 s, 并且几乎没有电压超调, 电压优化效果明显。

4 结语

本文通过含风电及储能的微电网电压-功率特性分析得出: 该类微电网电压波动在于风电输出功率(主要是有功功率)的变化和阻感性负载的投切。为此, 提出一种基于超级电容器储能的电压波动优化控制方法, 并对超级电容器储能的充放电控制策略进行了研究。实现了风电功率波动时系统母线电压的稳定控制; 大型阻感性负载投切、外部故障时, 该方法也能降低电压波动、减小电压恢复时间, 有效抑制风电功率波动和阻感性负载投切引起的电压波动, 仿真结果验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 邓威, 李欣然, 李培强, 等. 基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 216-225.
DENG Wei, LI Xin-ran, LI Pei-qiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.
- [2] 何世恩, 郑伟, 智勇, 等. 大规模集群风电接入电网电能质量问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 39-44.
HE Shi-en, ZHENG Wei, ZHI Yong, et al. Power quality issues of large-scale cluster wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 39-44.
- [3] NUNES M V A, LOPEST A P, ZURN H H. Influence of the variable speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(4): 692-701.
- [4] ZHOU Fengquan, JOOS G, ABBEY C. Voltage stability in weak connection wind farms[C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, CA, USA, 2005, 2: 1483-1488.
- [5] SMITH J W, BROOKS D L. Voltage impacts of distributed wind generation on rural distribution feeders[C] // Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2001, 1: 492-497.
- [6] SORENSEN P, ANCA D H, IOV F, et al. Wind farm models and control strategies[R/OL].[2010-03-01]. <http://130.226.56.153/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1464.pdf>.
- [7] 刘胜文, 包广清, 范少伟. PMSG 无功控制和低电压穿越能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 135-140.
LIU Sheng-wen, BAO Guang-qing, FAN Shao-wei. Research on reactive power control and the low-voltage ride-through capability of PMSG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 135-140.
- [8] LUO Chang-ling, HADI B, SHEN Bai-ke, et al. Strategies to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 341-349.
- [9] 张坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-241.
ZHANG Kun, WU Jian-dong, MAO Cheng-xiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-241.
- [10] 魏承志, 陈晶, 涂春鸣, 等. 基于储能装置与静止无功发生器协同控制策略的微网电压波动抑制方法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 18-24.
WEI Cheng-zhi, CHEN Jing, TU Chun-ming, et al. An

- approach to suppress voltage fluctuation in microgrid by cooperative control by energy storage device and static var generator[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 18-24.
- [11] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 135-140.
- YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 135-140.
- [12] 邓卫, 唐西胜, 裴玮, 等. 含风电微型电网电压稳定性分析及控制技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 56-62.
- DENG Wei, TANG Xi-sheng, PEI Wei, et al. Voltage stability and control technologies of micro-grid with wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 56-62.
- [13] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.
- ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011 39(7): 147-152.
- [14] 张慧妍, 韦统振, 齐智平. 超级电容器储能装置研究[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 92-96.
- ZHANG Hui-yan, WEI Tong-zhen, QI Zhi-ping. Study on ultracapacitor energy storage[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 92-96.
- [15] SCHUPBACH R M, BALDA J C. Comparing DC-DC converters for power management in hybrid electric vehicles[C] // Electric Machines and Drives Conference, Madison, USA: IEEE, 2003: 1369-1374.
- [16] 张国驹, 唐西胜, 周龙, 等. 基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15-21.
- ZHANG Guo-ju, TANG Xi-sheng, ZHOU Long, et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bi-directional converter in supercapacitor energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15-21.
- [17] 王久和. 电压型 PWM 整流器的非线性控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [18] COOPER K, DASGUPTA A, KENNEDY K, et al. New grid scheduling and rescheduling methods in the grads project[C] // Proceedings of 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004.
- [19] MICROGRIDS L B. Distributed power generation[C] // Power Engineering Society Winter Meeting, 2001: 146-149.

收稿日期: 2013-11-02; 修回日期: 2013-12-16

作者简介:

陈秋南(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电技术、分布式供电系统电压质量等;

韦 钢(1958-), 男, 通讯作者, 教授, 研究方向为电力系统运行分析与计算、新能源与电压质量等; E-mail: wg5815@sohu.com