

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191337

风电场下储能式高功率型 DVR 优化补偿策略研究

张志文¹, 彭政¹, 王卿卿¹, 黄际元², 谭黎军³

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 国网湖南省电力公司长沙供电分公司, 湖南 长沙 410015; 3. 特变电工衡阳变压器有限公司, 湖南 衡阳 421007)

摘要: 在风电场并网运行时, 电力系统面临组网重构时的 PV 节点暂态稳定、电能质量和容量协调运行机制变差等负面问题。针对并网型风电系统常用无功补偿装置进行低压穿越以向电网注入友好风能的特点, 构建了一种超级电容储能式高功率型动态电压恢复器(DVR), 对电网调度值和风电场输出功率进行监测, 由高功率型 DVR 协调功率控制。相比于传统储能式 DVR, 大幅降低了风电场并网母线点的谐波含量及储能装置容量。在 Matlab/Simulink 中搭建的仿真模型及小型实验验证了风电场下该 DVR 拓扑结构及其控制策略的正确性和有效性。

关键词: 风电场; 动态电压恢复器; 超级电容器; 高功率型; 协调控制

Research on an optimal compensation strategy of an energy storage high power DVR with wind farm

ZHANG Zhiwen¹, PENG Zheng¹, WANG Qingqing¹, HUANG Jiyuan², TAN Lijun³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Changsha Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410015, China;
3. TBEA Hengyang Transformer Co., Ltd., Hengyang 421007, China)

Abstract: A power system faces problems such as transient stability of PV nodes, worsening of power quality and capacity coordination when a wind farm is connected to a power system. In view of the circumstances in which a reactive power compensation device is used to inject friendly wind energy into the system, a supercapacitor energy storage high power DVR is proposed to detect the grid dispatching value and wind farm output power, and then the DVR coordinates power control. Compared with the traditional energy storage-type DVR, it significantly reduces the harmonic content of the bus point and the capacity of the energy storage device when the wind farm is put into the network. The simulation model built in Matlab/Simulink and experiment verifies the correctness and effectiveness of the DVR topology and its control strategy with a wind farm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477046), Scientific and Technological Research and Major Achievement Transformation Projects in Strategic Emerging Industries in Hunan Province (No. 2019GK4034).

Key words: wind farm; dynamic voltage restorer; supercapacitor; high power type; coordinated control

0 引言

近年来, 随着全球环境问题激增和传统能源的消耗, 风力发电系统得到了显著的发展。但是由于大规模接入电网之后, 将对现有的电网带来一定程度上的干扰, 主要体现在电能质量、调度运行和可

靠稳定等层次上面^[1-2]。目前常采用的并联型静止无功补偿器及串联型动态电压恢复器在无功补偿上发挥着可恢复性的作用^[3], 但是难以对风电场并网有功功率进行合理控制。依据储能装置的“削峰填谷”特性, 本文将其与无功补偿装置相结合, 达到风电场并网母线免受高次谐波分量和电压波动干扰的目的, 推动风力发电系统的安全并网运行发展^[4]。

当前, 国内外相关学者关于风电场的并网节点处电能质量治理做了如下研究: 文献[5]提出了一种应用于双馈感应型风电机的含蓄电池 DVR 动态补

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477046); 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目资助(2019GK4034)

偿方法,无论是恒功率输出还是无功补偿,补偿装置都能有效抑制风电波动,进一步提高风电的穿透水平。文献[6]研究了风电机组不对称故障时,DVR协助动态补偿以提高低压穿越能力的控制策略,响应速度快,效果好,但是该方案最大的缺点是成本高,故降低补偿容量也是个紧迫的研究课题。文献[7]针对双馈感应发电机,提出了一种基于超级电容器储能的动态电压调节器实现电压控制,以减少电网故障期间所需的DVR功率和容量,但并未对电网要求功率做调度监测。文献[8-9]提出了能够同时满足补偿电压约束及最小能量补偿目标的能量稳定补偿策略,对DVR补偿策略的设计及工程实践将具有重要意义,但存在储存容量小、接口数量多的问题。文献[10-11]提出采用辅助转子控制器和动态电压恢复器相结合的方法来提高故障穿越过程的平稳性,但动态响应效果差。文献[12-13]利用DVR对风电场35 kV出口电压进行补偿,可使风电场群

组的定子电压、转子电流和直流侧电压恢复至正常状态,但并网点谐波造成设备的热损耗大。

本文提出的超级电容储能式高功率型DVR主要解决以下问题:(1)针对并网型风电场的节点电能质量大幅度下降的特点,利用DVR的无功特性改善并网PV节点的谐波含量、电压闪变的稳定裕度。(2)针对风电场并网母线处的输出功率大、波动性高的特点,为节省变压器接口的数量,利用该DVR储能特性,直接对汇口母线串联补偿。(3)针对功率波动的时变性,利用超级电容特性,对补偿值进行快速的“削峰填谷”式动态容量储存和补偿。

1 系统结构和工作原理

图1为含超级电容储能式高功率型DVR的风电场并网系统结构图。DFIG发电机组由风轮机、齿轮箱、双馈感应发电机、转子侧变换器(RSC)/网侧变换器(GSC)和控制装置等构成^[14]。

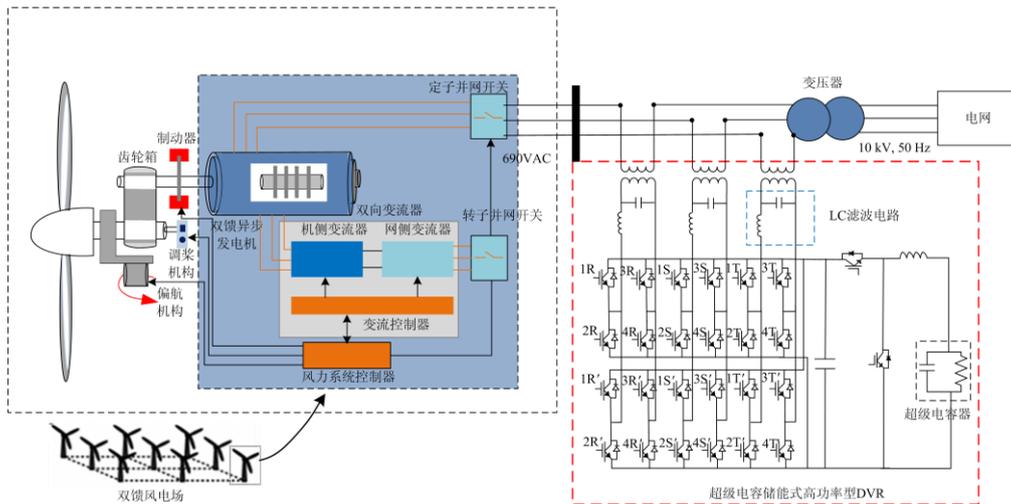


图1 含超级电容储能式高功率型DVR的风电场并网系统

Fig. 1 Grid connection system of wind farm with ultracapacitor type high-power DVR

高功率型DVR由超级电容器、双向DC/DC变换器、电压源型变流器、LC滤波装置、串联变压器和控制系统组成。6个单相VSC共用一个直流电源,使用6个单相的VSC结构,有利于提高DVR在电网故障时的补偿功率^[15]。VSC经LC滤波后通过串联变压器接入变压器前端和并网节点(PCC)之间,对并网PV节点的有功/无功功率进行补偿。

在并网PV节点负荷功率波动幅度不大,风电场的出力正常情况下,高功率型DVR不对并网节点功率进行补偿,主要将风力发电系统多余的容量进行储存并进行节点处的谐波含量治理。电网负荷波动较大和风电场出力不足时,高功率型DVR对

并网PV节点处的功率进行完全补偿。通过风电场输出的功率与高功率型DVR相协调的控制策略,利用超级电容的快速充放电特性,在不同的运行水平下调节并网节点处的有功功率和无功功率的大小,确保风电场的安全并网。

2 风电场的整体控制策略设计

目前大规模风电场的无功补偿策略以单场独立控制居多,但随着装机容量逐渐增大,风电场之间的出力有一定耦合特性,无功波动会进一步影响地区电压状况^[16-17]。故对风电场内的单台机组有功出力、无功优化以及确保风电机组低压穿越能力是

功率协调控制的前提条件。

2.1 机侧换流器(RSC)控制

RSC 的基本思想是利用电机定子的有功功率 P_s 、无功功率 Q_s 作为被控对象, 在 $d-q$ 参考坐标系中通过对转子电流控制实现独立控制。基于定子磁通与 d 轴同向时, 定子磁通 ψ_s 存在如下关系:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = \psi_s \\ \psi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

不计定子电阻 R_s 和定子磁通 ψ_s 状态的变化, 由此定子 P_s 和 Q_s 的输出功率分别随 $d-q$ 轴转子电流 I_{rd} 和 I_{rq} 存在着如下关系的动态变化。

$$\begin{cases} I_{rdref} = (K_{Qsp} + \frac{1}{K_{Qsi} \times s}) \times (Q_{sref} - Q_s) \\ I_{rqref} = (K_{Psp} + \frac{1}{K_{Psi} \times s}) \times (P_{sref} - P_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{Qsp} 和 K_{Psp} 为功率控制外环的比例系数; K_{Qsi} 和 K_{Psi} 为功率外环的积分系数; Q_{sref} 、 P_{sref} 和 Q_s 、 P_s 为单台机组输出的相应功率参考值和实际值; 下标中的“s”和“r”为区分定子或转子侧的参数。

因为转子电流由转子电压决定, 由式(1)和式(2)可以得到它们之间的关系为

$$\begin{cases} U_{rd}^* = (K_{Indp} + \frac{1}{K_{Indi} \times s}) \times (I_{rdref} - I_{rd}) \\ U_{rq}^* = (K_{Irqp} + \frac{1}{K_{Irqi} \times s}) \times (I_{rqref} - I_{rq}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_{Indp} 和 K_{Irqp} 分别为电压内环的比例系数; K_{Indi} 和 K_{Irqi} 分别为电压内环的积分系数; I_{rdref} 、 I_{rqref} 和 I_{rd} 、 I_{rq} 分别为机组转子电流 $d-q$ 轴的理论值和实际值。

综上, 通过生成的 $d-q$ 轴转子电压运用 $dq0/abc$ 变换生成三相调制波去控制定子的输出功率, 其控制框图如图 2 所示, 图中 SPWM 表示正弦波调制。

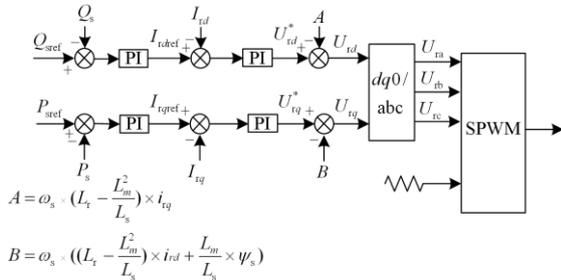


图 2 双馈感应发电机(DFIG)机侧控制策略

Fig. 2 Machine side control strategy of DFIG

2.2 网侧换流器(GSC)控制

GSC 的功能是控制 DFIG 的并网点有功输出 P_{net} 和无功输出 Q_{net} 。同样, 在 $d-q$ 参考坐标中, GSC 电流控制可以实现独立控制。假设基于定子电压 U_s 与 d 轴同向时, 即

$$\begin{cases} U_{sd} = U_s \\ U_{sq} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由 DFIG 的功率输出 P_{net} 和 Q_{net} 分别与 d 轴网侧电流 I_{std} 和 q 轴网侧电流 I_{stq} 有关, 可以得出:

$$\begin{cases} I_{stdref} = (K_{Pnetp} + \frac{1}{K_{Pneti} \times s}) \times (P_{net} - P_{netref}) \\ I_{stqref} = (K_{Qnetp} + \frac{1}{K_{Qneti} \times s}) \times (Q_{net} - Q_{netref}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_{Pnetp} 和 K_{Qnetp} 分别为电压控制内环的比例系数; K_{Pneti} 和 K_{Qneti} 分别为电压控制内环的积分系数; I_{stdref} 和 I_{stqref} 分别为单台机组转子电流 $d-q$ 轴的理论值; P_{net} 和 Q_{net} 为单台风电机组并网点的有功/无功功率实际值; P_{netref} 和 Q_{netref} 为单台机组并网点的有功/无功功率理论值。

综上所述, 通过网侧电压生成的 $d-q$ 轴转子电压运用 $dq0/abc$ 变换生成三相调制波去控制并网点的输出功率, 其控制框图如图 3 所示, 图中 SPWM 表示正弦波调制。

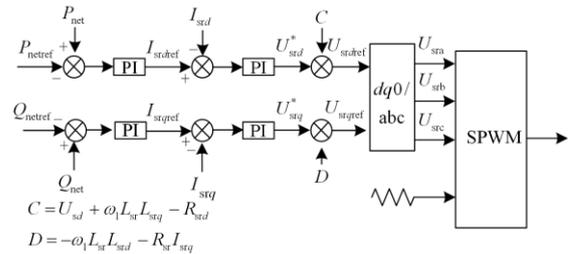


图 3 双馈感应发电机(DFIG)网侧控制策略

Fig. 3 Grid side control strategy of DFIG

3 高功率型 DVR 的协调控制策略改进

3.1 并网点功率补偿协调控制策略

图 4 为按照图 1 的系统原理设计的简化高功率型 DVR 串入电网的拓扑结构示意图。

根据能量守恒定理^[18], 系统整体表达式为

$$P_{gen} = \sum_{i=1}^n P_{neti} \quad (6)$$

$$P_{DVR} = P_d^* - P_{gen} \quad (7)$$

$$P_{DVR} = I_{DVR}^+ P_{gen} \quad (8)$$

全并网。以风电场的最佳运行状态为例, 电网功率要求风电并网功率小, 此时对应系统工作状态是高功率型 DVR 对应的最大储存容量值。当 n 逐渐增大时, 即风电场此时的出力逐渐减小, 或者要求的并网功率逐渐减小, 储能装置的储存容量和补偿容量并未发生改变, 但流经高功率型 DVR 的电流逐渐减小。随着 n 的增大, 并网点有功功率和高功率型 DVR 出力也逐渐减小, 由此比例关系 k 可得协调控制策略的方程组为

$$\begin{cases} P_{\text{gen}} = kP_{\text{DVR}} \\ P_{\text{DVR}} = |1 - nI_{\text{DVR}}| (P_d^* - P_{\text{gen}}) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)进一步可以推导风电场的输出功率和高功率型 DVR 的吸收和补偿功率之间存在着如下关于电网调度功率 P_d^* 的关系式:

$$\begin{cases} P_{\text{gen}} = \frac{P_d^*}{1 + k|1 - nI_{\text{DVR}}|} \\ P_{\text{DVR}} = \frac{P_d^* |1 - nI_{\text{DVR}}|}{1 + k|1 - nI_{\text{DVR}}|} \end{cases} \quad (11)$$

故在保证风电场输出功率恒定情况下, 通过改变该 DVR 的电流值来保持系统的动态功率平衡。

3.2 高功率型 DVR 内部环流抑制

高功率型 DVR 在实际运行过程中, 由于上下并联模块的 IGBT 实际规格参数不完全相同和三相线路的功率分配存在不均, 上下级联模块组中将在相之间产生环流^[21], 该环流不会进入网侧或负荷侧, 在内部会出现误差和响应迟缓。为此, 运用二倍频负序坐标变换^[22], 将三相时变环流分解成 2 个直流分量, 再通过正负序叠加变换调制, 其控制框图如图 7 所示, 图中 SPWM 表示为正弦波调制。

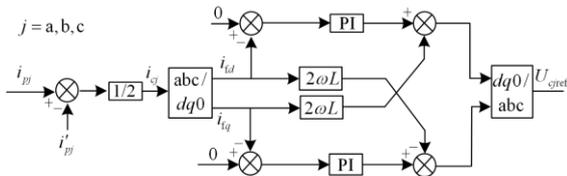


图 7 环流抑制控制策略

Fig. 7 Circulation suppression control strategy

4 DC/DC 控制策略及最优储能动态容量设计

4.1 DC/DC 控制策略

根据前级的高功率型 DVR 控制原理以及维持高功率型 DVR 的输出功率动态平衡要求。由此在储能式高功率型 DVR 工作期间, 超级电容通过双向 DC/DC 变换器控制其吸收或输出的有功功率平衡来维持高功率型 DVR 的直流侧电压稳定, 控制

框图如图 8 所示。

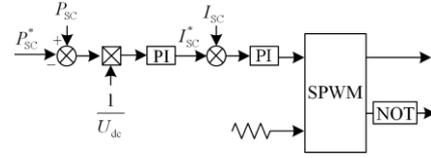


图 8 DC/DC 控制策略

Fig. 8 DC/DC control strategy

4.2 最优动态储能容量改进

按照电网要求的负荷调度值作为储能容量设计基础, 利用传统型 DVR 运行点优化值进行设计^[23-24]。考虑到风电场内单机输出都为 1 时储能动态容量达到最大, 以此为基础, 设电网调度负荷功率在 3 s 内无规律性波动, 为保证系统分析的正确性, 将并网的大电网等效为受控电流源, 且运行阶段可控稳压电流源损耗忽略不计。那么确保风电场内每台风电机组正常工作能够保证系统整个动态平衡的最大储存容量为

$$\int_0^3 (P_d^* - P_{\text{gen}}) dt \leq \int_0^3 |P_d^* - P_{\text{gen}}| dt \quad (12)$$

忽略系统中电能传输的损耗, 根据电网调度指令要求, 近似地认为 $P_{\text{gen}} = 1 \text{ p.u.}$ 。

$$P_{\text{DVR}} \geq 0.4 \quad (13)$$

为体现协调控制的动态容量与单独控制的取值的差异性^[25], 在上述计算下取 $P_{\text{DVR}} = 0.4$ 。对储能容量作如表 1 所示的优化计算。

表 1 储能容量的优化改进

Table 1 Optimization of energy storage capacity

控制方式	P_{DVR}	E_{DVR}
传统储能式 DVR 单独控制	0.81	1.582
风电场和高功率型 DVR 协调控制	0.36	0.832

由表 1 可得, 采用该协调控制策略后, 可以减小 DVR 工作期间所需的动态有功功率和容量。为减少启动初期不良影响造成的影响^[26], 取 $E_{\text{sc}}=0.9$ 。

5 仿真及实验验证结果

5.1 仿真验证及结果分析

以长沙某新能源企业在某地区建设的小型风电场例, 在 Matlab/Simulink 中搭建的仿真模型如图 1 所示。采用的仿真参数如下: 风电场中的双馈感应风电机组台数 $n=3$, 风电场中每台风机捕获的有效风速 $v=12 \text{ m/s}$, DFIG 的额定功率为 2 MW, 定子额定电压为 575 V, 定转子匝数比为 0.29, 定子电阻为 0.023 p.u., 转子电阻为 0.016 p.u., 定子漏感为 0.18 p.u., 转子漏感为 0.16 p.u., 励磁电感为 0.29 p.u., 转速阈值 $\omega_c=1.24 \text{ p.u.}$; 超级电容值 $C_{\text{sc}}=27.5 \text{ F}$,

$V_{sc}=540\text{ V}$, LC 滤波器的参数为 $L_f=1.5\text{ mH}$, $C_f=44.2\text{ }\mu\text{F}$ 。本文电网采用恒压受控电流源的功率曲线如图 9 所示, 由此对风电场并网谐波含量、储能装置的荷电状态和端电压、机组的低压穿越特性进行对比仿真实验。最后通过搭建的小型实物平台验证其控制策略的正确性。

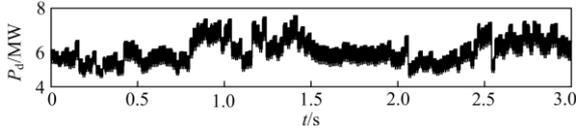


图 9 电网调度有功功率

Fig. 9 Active power of grid dispatching

图 10 验证得到风电场在后期输出功率整体达到动态平衡, 无并网振荡现象发生, 和储能式高功率型 DVR 达到协调运行, 确保了后续验证比较。系统保持最大有功功率输出, 功率因素在 0.80~0.93 波动。

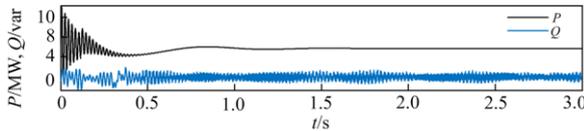


图 10 风电场输出有功/无功功率

Fig. 10 Active/reactive power output of wind farm

由图 11 和图 12 得: 采用高功率型 DVR 的并网风电系统其可以经 LC 滤波装置后有效抑制 PV 节点的高次谐波, 但系统中谐波含量较高的是 5 次谐波, 基波得到了无功补偿, 有效地减轻了风电场在并网运行时给电力系统所带来的稳定性下降、风电振荡等问题。另外, 在高功率型 DVR 的内部, 级联组内均流效果良好, 但存在较为低幅值的小环流信号, 能够避免因为环流给电力电子设备所带来的设备热损耗。

图 13 和图 11 相比, 传统单独控制的 DVR 的电流纹波相对比较大, 2、5、7 次谐波含量高, 给风电场的并网 PV 节点带来电能质量变差问题, 加大系统的投入和维护成本, 与此同时储能装置动态响应慢。

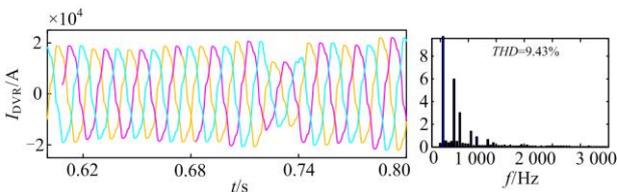


图 11 高功率型 DVR 投入运行部分电流

Fig. 11 Partial current of high-power DVR

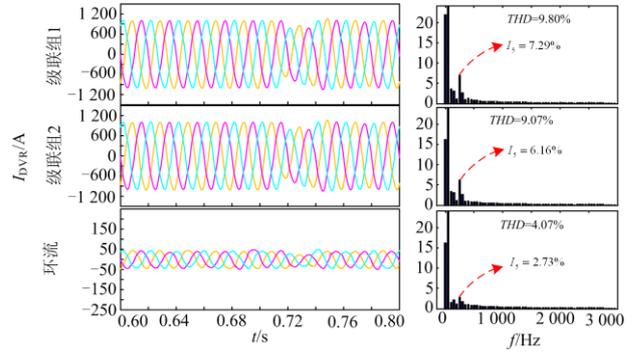


图 12 级联模块组电流及内部环流

Fig. 12 Cascade module group current and internal converter

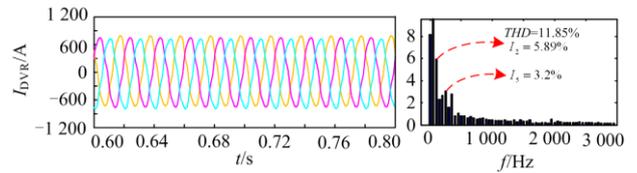


图 13 传统 1 MW 储能式 DVR 单独控制电流

Fig. 13 Single control current of traditional 1 MW DVR

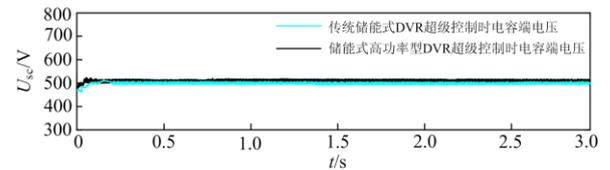


图 14 超级电容端电压对比

Fig. 14 Comparison of supercapacitor terminal voltage

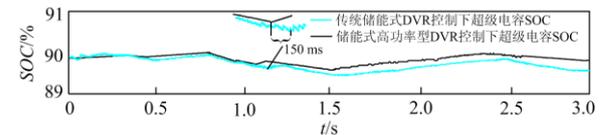


图 15 超级电容 SOC 变化对比

Fig. 15 Comparison of SOC changes of ultracapacitors

由图 14 和图 15 可知, 相比于传统储能式 DVR 单独控制时, 储能式超级电容容量动态容量设计得当, 在储能式高功率型 DVR 的协调控制下, 超级电容在充放电过程中, 其端电压基本维持恒定, 而且根据 SOC 值变化情况知, 两者存在 150 ms 的延迟, 储能式高功率型 DVR 的协调控制响应优于储能式 DVR 的单独控制。另外, 通过级联组协调储存和输出有功功率, 同时也利用传统 DVR 的特性, 对超级电容两端电压纹波有较好的抑制作用。

为了对比研究, 假设机组的风速为额定风速。依据风电并网导则对电网引入三相对称故障, 导致电网电压产生 80% 跌落并从 0.4 s 开始持续 0.6 s 的

工况, 机组网侧变流器对比电压波形如图 16 所示。

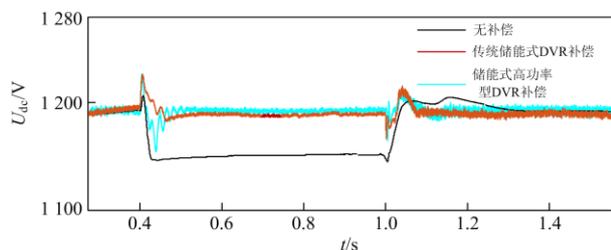


图 16 风电机组的网侧变流器直流侧电压

Fig. 16 DC side voltage of grid-side converter of DFIG

由图 16 验证得到在储能式高功率型 DVR 的协调控制策略下, 电网故障期间储能装置吸收掉风机电能与馈入电网的电能之间的不匹配电能, 平滑风机内部直流侧电压波动并提高电压穿越能力。

5.2 实验验证及结果分析

为验证本文协调控制策略相比传统储能式 DVR 的单独控制储能装置的充放电的优越性, 本文在 DSP TMS320F28335 上对控制策略比较实验, 采样频率为 10 kHz, 超级电容数值为 45 V、165 F, DVR 选用三相全控整流桥, 三相负载部分由不可控整流桥和阻感负载构成。通过改变控制策略对三相源端的电流波形谐波含量、电压跌落补偿响应和超级电容端电压进行检测。

利用三相调压器, 网侧电压初始值为 220 V, 当网侧电压跌落至 110 V 时, 得到的实验波形如图 17 所示, DVR 在网侧电压动作的 0.13 s 后开始补偿, 在电压的反馈作用下对网侧电压进行恢复。

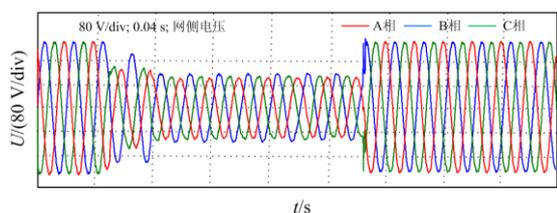


图 17 三相电源网侧电压

Fig. 17 Three-phase power grid side voltage

验证传统 DVR 电压补偿的正确性后, 对传统储能式 DVR 单独控制时和高功率型 DVR 协调控制时进行实验对比验证, 在传统储能式 DVR 中, 网侧谐波畸变率大, 如图 18 所示, 谐波主要以奇数次为主, 包含大量容性无功电流。接通本文设计的储能式高功率型 DVR 协调控制后, 如图 19 所示, 归因于储能部分功率和网侧功率协调控制, 网侧冲击电流和纹波电流得到了有效改善, 谐波畸变率降幅明显。

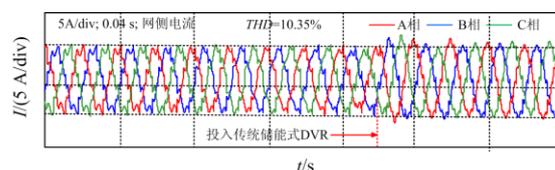


图 18 投入传统储能式 DVR 的网侧电流

Fig. 18 Net side current of traditional energy storage DVR

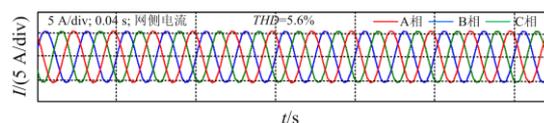


图 19 投入储能式高功率型 DVR 的网侧电流

Fig. 19 Net-side current of energy-storage high-power DVR

图 20 为超级电容储能端电压波形图, 可以看出高功率型 DVR 在协调控制时, 储能单元的端电压很好地稳定在了 41 V, 从而直观地体现了容量设计的合理性, 减小了储能单元的占地面积。

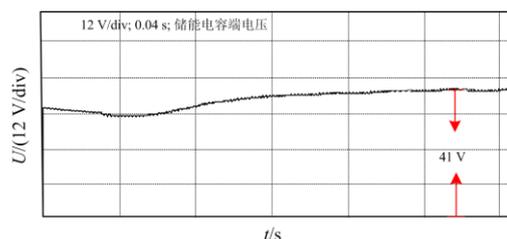


图 20 超级电容端电压

Fig. 20 Supercapacitor terminal voltage

6 结论

本文以风电场并网母线上谐波含量治理和有功功率分配为研究对象, 考虑 DVR 装置无功补偿和储能装置的有功消纳特性, 提出了一种储能式高功率型 DVR 的协调控制策略, 通过在 DVR 的网侧和储能侧有功功率的协调控制, 将含超级电容储能单元直接对母线串联补偿, 改变风电场侧和电网端的有功功率大小分配, 实现双端并网时馈线之间的柔性互联及能量交换。仿真和实验结果表明, 该储能式高功率型 DVR 在比例协调控制下, 相比于传统型 DVR 单独控制, 可以有效地降低风电场并网 PV 节点的谐波畸变率, 保障了风电场的安全稳定运行。超级电容的容量改进与优化有效地提高了储能单元利用率, 缩短了其响应时间, 减少了占地面积, 规范了系统的有序管理。

参考文献

- [1] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力

- 系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
- LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [2] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
- LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [3] 李军徽, 毕江林, 严干贵, 等. 大规模风电并网无功调控技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 42-48.
- LI Junwei, BI Jianglin, YAN Gangui, et al. Review on reactive power regulation techniques of large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(10): 42-48.
- [4] MUKHERJEE P, RAO V V. Superconducting magnetic energy storage for stabilizing grid integrated with wind power generation systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 2(7): 400-411.
- [5] CHEN Xia, YAN Linfang, ZHOU Xin, et al. A novel DVR-ESS-embedded wind energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1265-1274.
- [6] YAN L, CHEN X, ZHOU X, et al. Perturbation compensation-based non-linear adaptive control of ESS-DVR for the LVRT capability improvement of wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 13(12): 1500-1507.
- [7] 许建兵, 江全元, 石庆均. 基于储能型 DVR 的双馈风电机组电压穿越协调控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 14-20.
- XU Jianbing, JIANG Quanyuan, SHI Qingjun. Coordinated control of voltage ride through for DFIG wind turbine systems using energy-based DVR[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 14-20.
- [8] 刘颖英, 肖湘宁, 徐永海. 动态电压恢复器的能量稳定补偿特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 69-74.
- LIU Yingying, XIAO Xiangning, XU Yonghai. Characteristics analysis on energy steady compensation for dynamic voltage restorer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 69-74.
- [9] 石游, 杨洪耕. 带谐波补偿功能的动态电压补偿器[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 36-40.
- SHI You, YANG Honggeng. A dynamic voltage restorer with harmonic compensation function[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 36-40.
- [10] 朱三立, 卢继平, 梁沛. 超级电容在风电场相变储输一体化系统中的应用及特性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2632-2639.
- ZHU Sanli, LU Jiping, LIANG Pei. Application and characteristic analysis of phase-change energy storage and generating system in wind farm with super capacitors[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2632-2639.
- [11] 易桂平, 胡仁杰. 基于超级电容储能系统的动态电压恢复器研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 21-26.
- YI Guiping, HU Renjie. Dynamic voltage restorer based on super capacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 21-26.
- [12] 王有荣, 王媛, 那森. 电网电压不对称故障下 DVR 在风电场中的应用[J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1203-1208.
- WANG Yourong, WANG Yuan, NA Sen. Application of DVR in wind farm during asymmetrical grid voltage fault[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(8): 1203-1208.
- [13] 王振浩, 刘金龙, 李国庆, 等. 基于超级电容器储能的并网风电场功率与电压调节技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 113-116.
- WANG Zhenhao, LIU Jinlong, LI Guoqing, et al. Power and voltage regulation of wind farm based on EDLC energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 113-116.
- [14] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 基于风电场集中储能的风储柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 30-37.
- JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Research on flexible control strategy based on the centralized storage joint with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 30-37.
- [15] ZHENG Z, XIAO X, CHEN X, et al. Performance evaluation of a MW-Class SMES-BES DVR system for mitigation of voltage quality disturbances[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3090-3099.
- [16] 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.
- [17] MALACZEK M, WASIAK I, MIENSKI R. Improving quality of supply in small-scale low-voltage active networks by providing islanded operation capability[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(1): 2665-2672.
- [18] 聂永辉, 王中杰, 李江, 等. 大规模风电并网电力系统优化潮流[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 3180-3187.
NIE Yonghui, WANG Zhongjie, LI Jiang, et al. Optimal power flow for larger-scale wind power integration[J]. Acta Energies Solaris Sonica, 2017, 38(11): 3180-3187.
- [19] 涂春鸣, 孙勇, 郭祺, 等. 适用于动态电压恢复器的最小能量柔性切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 3035-3045.
TU Chunming, SUN Yong, GUO Qi, et al. The minimum energy soft-switching control strategy for dynamic voltage restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 3035-3045.
- [20] 周雪松, 张智勇, 马幼捷. 级联动态电压恢复器的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 74-77.
ZHOU Xuesong, ZHANG Zhiyong, MA Youjie. Study on interline dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 74-77.
- [21] SUN H, WANG H, QI W. Automatic power decoupling controller of dependent power decoupling circuit for enhanced transient performance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1820-1831.
- [22] 何国锋, 徐德鸿. 基于解耦控制的多模块逆变器并联系统直流环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 43-51, 176.
HE Guofeng, XU Dehong. The DC circulation current control strategy based on decoupled control scheme in the multi-module paralleled inverter system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 43-51, 176.
- [23] 易桂平, 胡仁杰. 基于超级电容储能系统的动态电压恢复器研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 21-26.
YI Guiping, HU Renjie. Dynamic voltage restorer based on super capacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 21-26.
- [24] LI Zhengming, LI Wenwen, PAN Tianhong. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 78-85. DOI: 10.1186/s41601-016-0018-9.
- [25] 范永宇. 动态电压恢复器的直流储能系统关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
FAN Yongyu. Study on the key technologies of the DC storage energy system in DVR[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [26] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 108-114.
DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 108-114.

收稿日期: 2019-10-28; 修回日期: 2020-06-15

作者简介:

张志文(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流电能变换系统理论与新技术、电能质量分析与控制、电力系统谐波抑制; E-mail: hdzzw@hotmail.com

彭政(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子化配电网稳定性分析及储能应用技术; E-mail: pengzheng@hnu.edu.cn

王卿卿(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行控制与状态监测。E-mail: 1421380947@qq.com

(编辑 葛艳娜)