

企业供电网电压暂降快速补偿技术研究

王永华, 张亚超, 高凯晨, 于尧
北京首钢国际工程技术有限公司, 北京 100072
DOI:10.61369/ERA.2025110018

摘要: 本文立足于工业生产现场实际面临的电压暂降问题, 通过梳理相关文献, 深入剖析了电压暂降的成因与传播机理, 并系统评估了其各类生产敏感设备的影响程度。在此基础上, 重点研究了动态电压恢复器的监测与补偿配置技术, 并结合具体项目案例验证了所提方案的有效性与应用价值。

关键词: 电压暂降; 分级补偿; 动态电压恢复; 闭环控制

Research on Rapid Compensation Technology for Voltage Sags in Enterprise Power Supply Networks

Wang Yonghua, Zhang Yachao, Gao Kaichen, Yu Yao
Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100072

Abstract: This paper addresses the practical challenges of voltage sags encountered in industrial production. By reviewing existing literature, it conducts an in-depth analysis of the causes and propagation mechanisms of voltage sags, and systematically evaluates their impact on various types of sensitive production equipment. Furthermore, it focuses on the research of dynamic monitoring and Dynamic Voltage Restorer (DVR) compensation configuration technologies, and the effectiveness and application value of the proposed scheme are verified through specific project cases.

Keywords: voltage sag; graded compensation; dynamic voltage restoration; closed-loop control

引言

随着现代工业生产向着自动化、智能化方向飞速发展, 企业对电能质量的依赖性日益增强, 其中电压暂降问题已成为影响企业稳定生产的关键因素之一。为追求更高的生产效率与设备性能, 大量对电压波动极为敏感的高新技术电子设备被广泛应用于产线, 这使得企业对供电可靠性的要求达到了前所未有的高度。电压的任何微小波动都可能导致敏感设备停机, 进而引发连锁生产事故, 造成巨大的经济损失。大量研究表明, 在各类电能质量问题中, 电压暂降的发生频率居于首位。近年来, 随着高灵敏度负载的普及, 由电压暂降引发的直接和间接经济损失正逐年攀升。在工业领域, 电压暂降是造成生产线意外停机的主要原因之一, 因此, 如何有效防治电压暂降, 已成为当前电力技术与工业控制领域亟待解决的重要课题^[1-3]。

输配电网中的突发短路故障是引发电压暂降最主要的原因。短路故障类型多样, 可能发生于相与地、相与相之间, 甚至多相与地之间。故障发生时, 短路点电压会急剧下降, 甚至为零, 而距离故障点越近, 暂降程度越严重, 随着距离的增加, 电压水平逐步恢复。继电保护装置动作并切除故障后, 非故障区域的电压能迅速恢复正常水平, 但故障区域将失电。多数短路故障可通过自动重合闸清除, 从而快速恢复供电。例如, 当变电站某条出线发生短路并被切除时, 其连接的网络便会监测到电压暂降。据统计, 单相、两相、两相接地及三相短路的占比分别约为70%、15%、10%和5%, 由短路故障引起的电压暂降事件占总数的70%以上, 且极易造成严重的暂降, 导致巨大的经济损失^[4]。

此外, 大容量负荷的投切、变压器空载合闸以及大型电动机的直接启动等操作, 也会产生类似短路冲击的大电流, 进而引发电压暂降。以电动机全压启动为例, 其启动电流可达额定电流的5至8倍, 巨大的冲击电流在网络阻抗上产生显著压降, 形成电压暂降。此类暂降持续时间相对较长, 若暂降幅度过大, 同样会使敏感设备无法正常工作, 甚至引发事故。

一、快速补偿技术 (DVR) 研究

(一) DVR 概述

动态电压恢复器是一种基于电力电子技术的快速电压补偿装置。其硬件系统主要由逆变器、储能单元（如蓄电池）、滤波器和变压器四部分构成。DVR 的核心功能是在电网电压发生暂降或暂升时，能够以极快的速度向系统注入补偿电压，从而维持负载侧电压的稳定。同时，它还能有效抑制电压中的谐波、闪变等扰动，是解决动态电压质量问题的重要设备，其快速的响应特性保证了为敏感负载提供高质量的正弦波电能^[5-9]。

当前，国内外关于 DVR 的研究主要集中在提升其经济性与可靠性，主要涵盖三个方向：

- (1) DVR 拓扑结构及储能系统优化；
- (2) DVR 补偿控制策略研究；
- (3) 电压暂降快速检测方法研究。

DVR 的电路拓扑结构直接影响其补偿效果和系统可靠性。目前主流的拓扑结构有两种：主要应用于中压系统的串联变压器型和主要用于低压系统的无变压器（或串并联混合）型。串联变压器型方案通过升压变压器接入电网，优点是可以降低直流逆变侧的电压等级，实现电气隔离。然而，其缺点也十分明显：变压器造价高、占地面积大，且其非线性特性会引入谐波问题，对变压器容量设计提出挑战，导致成本上升。因此，在低压场合，通常采用无串联变压器的 DVR 方案，以简化结构、降低成本^[7-9]。

(二) 动态电压恢复器 DVR 的数学模型

建立精确的数学模型是研究 DVR 控制策略的基础。三相 DVR 系统结构复杂，数学建模难度较大。为简化分析，本文以单相 DVR 为例建立其数学模型，该模型同样适用于对控制策略的初步研究。

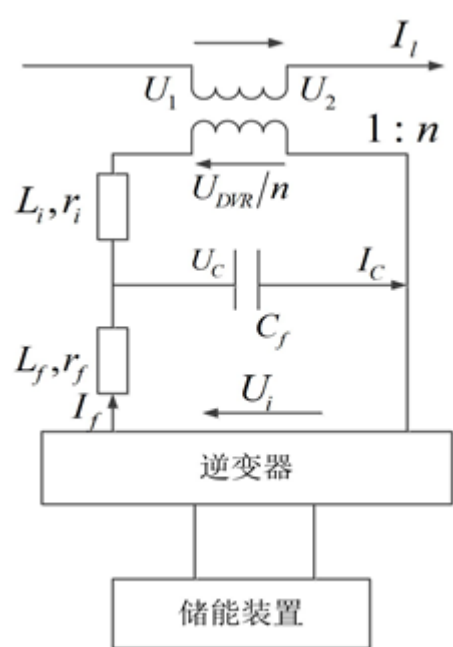


图 2-1 单相 DVR 串联于电网的等效电路图

如图 2-1 所示，该电路描述了一个单相 DVR 与配电路串

联的工作模型。图中，图中 U_1 为系统中的依靠电源来供给电能电压值， U_2 表示的为负载的电压， U_i 为逆变元器件的输出电压值， U_{DVR} 为 DVR 输出的用来去补偿的电压值， I_f 表示的是负载的电流，滤波器的电感电流就用 I_f 来表示，滤波电容的电流就用 I_c 来表示，滤波器的电感就用 L_f 来表示，滤波器的电容那就不用 C_f 来表示，滤波电感的阻抗就用 r_f 来表示，变压器的电感就用 L_i 来表示，为变压器的电阻就用 r_i 来表示，假如变压器变比是 $1:n$ 。依据基尔霍夫 KVL 和 KCL 定律，于是我们可以得到如下的方程组：

$$U_i = U_c + I_f \cdot r_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (2-1)$$

$$I_f = I_c + n \cdot I_L \quad (2-2)$$

$$I_c = C_f \frac{dU_c}{dt} \quad (2-3)$$

$$U_{DVR} = n \left[U_c - n \left(r_i \cdot I_i + L_i \frac{dI_i}{dt} \right) \right] \quad (2-4)$$

$$U_2 = U_1 + U_{DVR} \quad (2-5)$$

联立上述方程，可求解出系统的传递函数，从而构建 DVR 的数学模型。

(三) 动态电压恢复器 DVR 的检测算法

检测算法是 DVR 系统的核心技术之一，其性能直接决定了补偿的及时性与准确性。该算法需实时捕捉电压暂降的幅值、相位跳变、持续时间和发生频次等信息，并快速准确地分离出需要补偿的电压畸变分量，是实现精确补偿的前提。

目前，常用的电压暂降检测方法包括：有效值算法、基波分量法、基波正序分量法、小波变换法等。其中，三相瞬时无功功率 dq 检测法应用广泛。该方法首先通过 Park 变换将三相电压转换到 d-q 旋转坐标系，然后利用移动平均法或低通滤波器提取 d-q 轴下的直流分量。通过计算这两个直流分量的幅值，并与标准电压幅值进行比较，即可判断是否发生电压暂降，暂降的幅值大小即为判断依据。

二、DVR 应用研究

(一) DVR 产品市场应用状况

工业生产流程的连续性要求极高，任何环节的供电异常都可能导致整个生产线的停滞。这种对电压暂降的高度敏感性催生了巨大的市场需求，使得 DVR 产品市场参与者众多。市场调研显示，现有 DVR 产品多应用于低压侧，其补偿容量相对有限，且产品价格随容量增加而显著上升^[9-10]。以某品牌产品为例，其额定电压等级覆盖 208V、400V、690V，补偿范围为 0%~130%，输出频率为 50/60Hz ± 10%，全响应时间小于 2ms，补偿精度误差小于 1%，补偿时间可在 0.4 至 30 秒之间定制，额定容量从 10KVA 至 5000KVA 不等，价格从数万元到数百万元。

市场上主流 DVR 产品的工作原理基本一致：在电网稳定运行

时, DVR 处于热备用模式, 双向 DC/AC 逆变器通过算法为储能单元浮充电, 并持续监测电网电压。一旦检测到电压跌落 (通常在 500 微秒内), 系统立即切换至补偿模式, 利用储能能量, 通过逆变器输出与跌落前电压同频同相的补偿电压, 保障敏感负载的电能质量。电网电压恢复后, DVR 再无缝切换回正常供电模式。

不同工业负载对电压暂降的耐受能力和影响机理各不相同。根据设备特性, 可将其分为三类进行分析:

普通低压负载, 其控制回路与主回路通常取自同一母线。电压暂降会导致两者电压同时下降。主回路电压降低可能引发电机低电压保护或因电流激增而触发过流保护。控制回路电压下降则可能导致接触器线圈释放, 造成电机跳闸。

高压电动机, 其控制回路通常由直流屏供电, 不存在接触器释放问题。但为了避免恢复供电时多台电机同时启动造成母线电压骤降, 通常设有低电压保护。暂降时, 为维持功率, 电机电流会迅速上升, 若超过定值, 则会触发过流保护。

变频器负载, 内部含有大量电力电子元件, 对电压变化极为敏感, 普遍设有直流母线欠压、过压、整流 / 逆变过流等多重保护, 极易因电压暂降而停机, 是电压暂降治理的重点对象。

(二) 研究成果及创新方法措施

基于上述分析, 针对工业生产中频发的电压暂降问题, 可采取以下综合治理措施:

1. 优化 10kV 系统继电保护定值

针对 10kV 电动机, 应根据生产工艺的实际需求, 审慎评估其低电压保护的必要性。若确需保留, 则应适当调整保护定值并增加延时 (通常 0.5 秒即可抵御绝大多数暂降故障), 避免保护误动。

2. 调整低压变频器欠电压保护定值

低压变频器的欠电压保护旨在防止整流和逆变模块因过流而损坏。分析表明, 电压暂降的持续时间通常在 200 毫秒以内, 短时电压波动一般不会损坏模块。因此, 可将欠电压保护的故障判定延时增加至 0.2-0.3 秒, 以提高其抗暂降能力。

3. 增设低压控制回路抗晃电措施

为解决电压暂降导致接触器释放的问题, 可采用两种方案:

a. 加装防晃电装置。在接触器线圈回路中串联该装置。发生晃电时, 装置能迅速切断市电, 转由内部超级电容为线圈供电, 维持吸合。来电后自动切换回市电。

b. 更换为抗晃电接触器。对接触器进行改造, 内置储能元件和逻辑控制电路, 实现延时释放。但此方案因低压电机回路数量庞大, 改造成本较高。

4. 创新性应用动态电压恢复装置

传统 DVR 主要用于 400V 低压系统, 单台容量可达 2500kVA, 但成本随容量急剧上升, 难以用于整段母线补偿。考虑到企业中最敏感的负荷是低压电机控制回路, 本文提出一种低成本、高效益的创新方案:

a. 设置独立控制母线。通过专用的控制变压器将 380V 主母线电压降至 220V, 形成独立的控制电源母线, 所有电机的控制电源均取自此母线。

b. 配置小容量单相 DVR。在控制变压器与控制母线之间, 仅需安装一台小容量 (通常 5kVA 即可满足需求) 的单相 DVR。该 DVR 仅需补偿控制回路的功率, 却能达到与在主回路串联大容量三相 DVR 相同的保护效果。

此方案以极小的投入, 实现了对核心生产环节的有效保护, 极大地提升了企业的投入产出比。

三、结束语

电压暂降治理是一项复杂的系统工程, 涉及电力部门、电力用户及设备制造商的协同合作。本文通过研究电压暂降对敏感设备的影响机理, 并提出了针对性的解决方案, 对评估暂降影响和制定缓解策略具有重要的参考价值。同时, 在当前电能质量监测网络尚不完善的背景下, 研究电压暂降的传播特性、分析低压设备承受能力以及开发动态监测与分级补偿配置技术, 对于保障工业生产的电能安全具有显著的工程意义。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 中国电力出版社, 2010.
- [2] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析 [J]. 电网技术, 2001(03): 68-71.
- [3] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [4] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 (下册) [M]. 华中工学院出版社, 1985.
- [5] 赵芳, 杜兆斌. 敏感负荷对含新能源配网规划的影响 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(05): 62-69.
- [6] 句符兵. 配电网电能质量敏感负荷分析 [J]. 机电信息, 2014(24): 13-14.
- [7] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010(04): 3-9.
- [8] 能源评论. 打造“泛在电力物联网”应规划先行 [J]. 物联网技术, 2019, 9(03): 11-13.
- [9] 汪颖, 禹华西, 马明, 等. 基于余弦相似度的电压暂降 / 暂升类型模式匹配方法 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(04): 171-175.
- [10] 吕金炳, 卢文清, 刘创华, 等. 基于能量指标的电压暂降严重程度评估方法研究 [J]. 现代电力, 2019, 36(1): 79-87.