

[电压暂降]

基于石化企业电网仿真的电压暂降治理研究

文/钱志红 刘小多 李君
中石化（大连）石油化工研究院有限公司

电压暂降会造成电气设备性能下降、控制系统失稳等严重问题，治理电压暂降对于提升石化企业电网电能质量有重要意义。针对石化企业电压暂降问题进行关键因素特征分析，构建复杂的电网仿真潮流模型，针对更换高阻抗变压器、FC回路改造及催化机组新增发电机三项治理措施进行仿真分析，显著提高石化企业电网运行的稳定性及可靠性。

随着科技进步和社会发展，电力不仅仅为基本生活和工业生产提供动力，更是支撑现代信息社会运转的关键基础。电力设备的现代化和工业规模扩大，意味着电力系统面临着前所未有的挑战和需求，当前社会对电网电能质量的要求也越来越高^[1]。电压暂降已成为公用事业公司及消费者日益关注的问题，在工业生产中，电压暂降占电能中断故障的92%~98%，治理电压暂降对于提升电网电能质量有重要意义。

电压暂降通常持续的时间很短，从半周期到几秒钟不等，但足以影响到敏感的电气和电子设备的正常运行^[2]。石化企业的生产流程涉及高温高压的化学反应，电压暂降可能导致关键设备突然停止，任何意外的设备停机都可能引发安全事故，如火灾、爆炸或有毒物质泄漏。治理电压暂降可以防止此类事件发生，保障人员和设备的安全。炼化生产通常是长周期连续过程，一旦发生电压暂降，即使短暂的停机也可能导致生产线的完全停止，重新启动需要消耗大量时间和资源^[3]。治理电压暂降可以减少非计划停机，保持生产的连续性和效率，有利于避免经济损失，还可以减少设备的故障率，延长其使用寿命，降低维护成本。电压暂降可能影响产品的纯度和一致性，治理电压暂降，可以确保电力

供应的稳定，从而提高最终产品的质量。最后，治理电压暂降有助于更好地整合间歇性能源，提高电网对可再生能源的接纳能力。综上所述，治理电压暂降对石化企业而言，不仅是技术上的挑战，更是实现经济效益、安全生产和社会责任的重要途径^[4]。

本研究以治理电压暂降，增强电网稳定性，提升电网电能质量为目标，针对企业电网进行建模仿真，提出更换高阻抗变压器、FC回路改造及催化机组新增发电机组治理措施，并进行仿真分析，验证了治理措施的可行性与效果。

电压暂降特征分析

电网系统电源阻抗附近的线路上可能出现远超正常值的超大电流，致使阻抗上的分压迅速增大，带来线路负载侧的电压暂降故障。日常电力系统中雷击、短路故障、大容量电动机启动和变压器组的投切等，均会引起电压暂降^[5]。

1. 不同原因引起电压暂降特性分析

(1) 短路故障引起电压暂降特性分析

短路故障是电力系统中最严重的故障类型之一，它不仅会导致电压暂降，还可能引起系统其他部分的连锁反应，如跳闸、设备损坏等，严重影响电力

系统的稳定性和安全性。当短路故障发生时,故障点附近的母线电压会因为电流的突然增大而急剧下降,形成电压暂降。这是因为电力系统中的电源必须克服短路点的低阻抗,向短路点提供巨大的电流,从而消耗了大量的电源能量,导致电压水平下降^[6]。

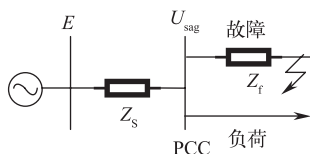


图1 短路故障引起电压暂降

图1为电网发生短路故障后的等效系统模型,其中PCC为公共耦合点, Z_s 为系统等效到PCC点的阻抗, Z_f 为故障点到PCC点的线路阻抗。当电力系统中某处发生短路故障时,该故障点与PCC之间的阻抗 Z_f 会成为电流流过的路径之一,而系统电源通过系统阻抗 Z_s 向故障点提供电流。由于短路电流远大于正常运行时的电流,导致流经系统阻抗 Z_s 的电压降显著增加,从而降低了PCC处的电压。具体来说,当短路发生时,PCC处的电压 U_{sag} 为

$$U_{sag} = E - I(Z_s + Z_f) \quad (1)$$

式中, E 为电源的电动势,通常假设为PCC点在正常运行时的电压; I 为流过 Z_s 和 Z_f 的电流,即短路电流。

(2) 变压器投切引起电压暂降特性分析

变压器投切,即变压器接入或退出电力系统是电力系统运行中常见的操作,这一过程可能引起电压暂降^[7]。当变压器投入电力系统时,系统中会出现以下几种效应,可能导致电压暂降。一是涌流引起电压暂降,变压器投入时,如果电压恰好在峰值附近,产生很大的励磁涌流,这股电流远远超过变压器的额定电流。涌流在线路上产生额外的电压降,导致电压暂降。二是磁通饱和引起电压暂降,涌流还会导致变压器铁心暂时饱和,进一步加剧电压降的问题,因为饱和降低了变压器的阻抗,使得更多的电流流入系统。三是系统振荡引起电压暂降,变压器的投入可能会引起电力系统内部的暂态振荡,导致电压水平的波动^[8]。

对于变压器投入引起的电压暂降,电压降 ΔV 的大小为

$$\Delta V = I_{inrush} \cdot Z_{sys} \quad (2)$$

式中, I_{inrush} 为变压器投入时产生的励磁涌流; Z_{sys} 为系统阻抗,从电源到变压器位置的阻抗。励磁涌流 I_{inrush} 的大小为

$$I_{inrush} = I_0 \cdot \cos(\phi) \quad (3)$$

式中, I_0 为变压器的空载电流; ϕ 为系统电压波形相对于变压器铁心磁通密度的相位角。

2. 电压暂降的特征量

电压暂降的幅值、持续时间和频次是电压暂降最主要的三个特征量。这些参数共同定义了电压暂降,对于评估电压暂降对电力系统和敏感设备的影响至关重要。

暂降幅值指电压暂降期间,电压有效值相对于正常电压值的下降百分比。暂降幅值越大,对设备的影响通常也越严重。暂降持续时间指电压从开始下降到恢复到正常水平所经历的时间。持续时间可以从几毫秒到几秒钟不等。长时间的电压暂降可能对设备的运行和数据完整性产生更严重的影响。暂降频次指在特定时间内电压暂降发生的次数。频繁的电压暂降,即使每次下降的幅度不大,也可能对设备的寿命和性能产生累积的负面影响。除了这三个基本参数之外,电压暂降的另一个重要方面是相位角的变化,即电压暂降期间电压波形相对于正常状态的相位偏移,相位角的变化可能会影响设备的同步能力和性能。

电压暂降治理措施

1. 电网建模仿真

以某电网110 kV站线路潮流数据为例,仿真模型潮流准确度分析见表1。

表1 仿真模型潮流精度分析

线路	观测点	SCADA潮流	仿真潮流	仿真准确度 (%)
线路1	有功功率/MW	35.039	36.909	94.66
	无功功率/Mvar	10.764	10.389	96.52
	母线电压/kV	113.06	113.07	99.99
线路2	有功功率/MW	32.791	34.494	94.81
	无功功率/Mvar	7.046	7.270	96.82
	母线电压/kV	112.78	112.94	99.86

由表1可知,仿真模型潮流准确度高于94.66%,能够用于电压暂降治理措施分析。

2. 电压暂降治理措施

常见的电压暂降治理措施有增加无功补偿设

备、安装TPM-K防晃电接触器或其他TPM抗晃电装置、安装静态开关、增加备用容量或改变网络结构等，结合石化企业电网实际情况，本文提出以下三种治理措施。

(1) 更换高阻抗变压器

以35 kV焦化变电站为例，更换高阻抗变压器，将焦化变电站 $2 \times 25 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 变压器阻抗电压由8.1%提高到12%。模拟1#焦化、2#焦化6 kV出线回路故障，仿真设置如下：1.0 s分别在1#焦化Ⅰ、Ⅱ段，2#焦化Ⅰ、Ⅱ段母线设置三相短路故障，1.12 s三相短路故障清除。更换高阻抗变压器前后各35 kV变电站6 kV母线电压水平对比情况详见表2。

表2 更换高阻抗变压器前后各35 kV变电站6 kV母线电压水平对比

母线电压	阻抗 8.1%	阻抗 12%	备注
一站6 kV Ⅰ段电压 (pu)	0.771	0.887	1#焦化Ⅰ段出线故障
二站6 kV Ⅰ段电压 (pu)	0.731	0.853	
焦化6 kV Ⅰ段电压 (pu)	0.148	0.500	
加裂6 kV Ⅰ段电压 (pu)	0.706	0.848	1#焦化Ⅱ段出线故障
一站6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.658	0.809	
二站6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.666	0.821	
焦化6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.142	0.486	2#焦化Ⅰ段出线故障
一站6 kV Ⅰ段电压 (pu)	0.665	0.819	
二站6 kV Ⅰ段电压 (pu)	0.751	0.882	
焦化6 kV Ⅰ段电压 (pu)	0.711	0.848	2#焦化Ⅱ段出线故障
加裂6 kV Ⅰ段电压 (pu)	0.070	0.483	
加裂6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.682	0.842	
一站6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.593	0.773	2#焦化Ⅱ段出线故障
二站6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.598	0.783	
焦化6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.059	0.451	
加裂6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.595	0.780	

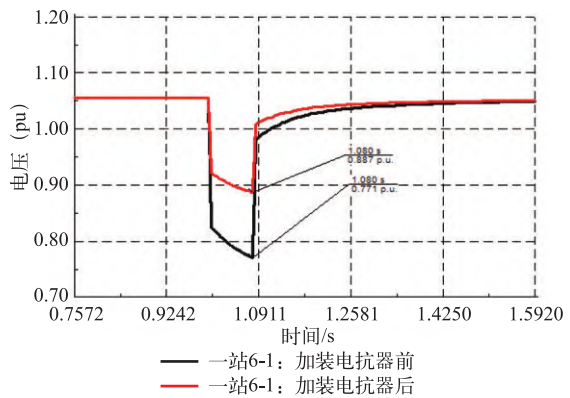


图2 更换高阻抗变压器前后电压对比-1#焦化Ⅰ线故障

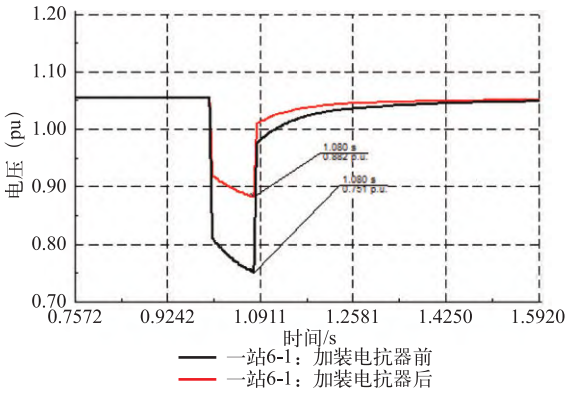


图3 更换高阻抗变压器前后电压对比-2#焦化Ⅰ线故障

仿真结果如图2、图3所示，可知，变压器阻抗由8.10%提升至12.00%后，电压暂降时非故障区域6 kV母线平均电压水平由67.22%提升至82.88%，平均电压水平增幅为15.66%，平均电压水平提升到77%以上，显著治理电压暂降，提高了设备运行稳定性。

(2) FC回路改造

FC回路通常指的是固定电容器回路，这是一种在电力系统中用于改善功率因数的装置。在工业和商业设施中，由于大量使用感应电动机和变压器，电力系统往往呈现出感性负荷特性，导致功率因数较低。为了提高效率和减少能源浪费，通常会安装电容器组来补偿感性负荷，使系统向单位功率因数靠近。通常可以通过提高功率因数、增强无功功率支撑、快速响应和提供临时的有功功率支持来间接或直接地缓解电压暂降的影响。FC回路使用快速熔断器加真空接触器组成的复合开关，一般用在1 000 kW以下电动机或者1 250 kV·A变压器上。1 000 kW及以下电动机改为FC回路，主要用于快速切除6 kV电动机回路故障。

以2#焦化配出回路发生三相短路故障为例，仿真设置为：1.0 s在2#焦化Ⅱ段母线设置三相短路故障，1.02s2#焦化Ⅱ段母线三相短路故障清除。35 kV变电站6 kV母线电压波动情况见表3。

表3 35 kV变电站6kV母线电压波动情况

母线电压	真空断路器 (80 ms)	FC回路 (20 ms)
一站6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.666	0.694
二站6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.674	0.717
焦化6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.200	0.215
加裂6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.671	0.717
一站6 kV Ⅱ段电压 (pu)	0.666	0.694

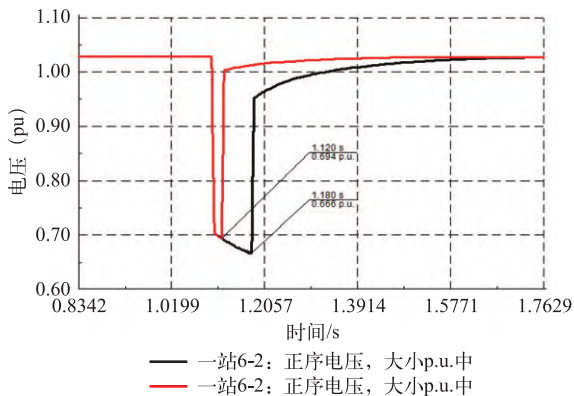


图4 FC回路改造前后电压对比

仿真结果对比如图4所示，电动机FC回路改造后非故障区域平均电压水平提高5.81%，电压暂降持续时间降低75%。虽对电压暂降的幅值提升幅度较小，但大幅减少了电压暂降的持续时间，故障切除后电压恢复值高。

(3) 催化机组投运

以6 kV电缆故障对石化企业电网的影响为例，进行催化改造，新增2台发电机组仿真分析。1.0 s在6 kV配出线100%处设置单相接地故障，1.1 s单相接地故障清除，设置三相短路故障，1.16 s进线开关跳闸，三相短路故障切除（10 ms保护响应时间+50 ms开关分闸时间），1.24 s 6 kV分段开关合闸（10 ms快切响应时间+70 ms开关合闸时间）。各35 kV变电站6 kV母线电压波动情况详见表4、表5。

表4 新增发电机组前35 kV变电站6 kV母线电压波动情况

故障点	一站6 kV I / II 段	二站6 kV I / II 段	焦化6 kV I / II 段	加裂6 kV I / II 段
	电压幅值 (pu)	电压幅值 (pu)	电压幅值 (pu)	电压幅值 (pu)
常开 I 线	0.236	0.788	0.764	0.772
常开 II 线	0.179	0.719	0.714	0.718
加氢处理 I 线	0.184	0.776	0.751	0.759
加氢处理 II 线	0.144	0.708	0.704	0.707
循开 I 线	0.193	0.778	0.752	0.761
循开 II 线	0.095	0.694	0.690	0.693
2#常开 I 线	0.093	0.757	0.728	0.736
2#常开 II 线	0.069	0.687	0.683	0.686
码开 I 线	0.481	0.846	0.833	0.840
码开 II 线	0.385	0.783	0.778	0.782
加开 I 线	0.185	0.772	0.746	0.754
加开 II 线	0.139	0.703	0.699	0.702
空开 I 线	0.161	0.771	0.744	0.752
空开 II 线	0.122	0.702	0.697	0.701

表5 新增发电机组后35 kV变电站6 kV母线电压波动情况

故障点	一站6 kV I / II 段	二站6 kV I / II 段	焦化6 kV I / II 段	加裂6 kV I / II 段
	电压幅值 (pu)	电压幅值 (pu)	电压幅值 (pu)	电压幅值 (pu)
常开 I 线	0.240	0.817	0.797	0.808
常开 II 线	0.186	0.808	0.786	0.791
加氢处理 I 线	0.193	0.807	0.789	0.793
加氢处理 II 线	0.098	0.788	0.764	0.772
循开 I 线	0.493	0.875	0.864	0.870
循开 II 线	0.186	0.806	0.780	0.791
2#常开 I 线	0.163	0.800	0.778	0.788
2#常开 II 线	0.187	0.747	0.746	0.750
码开 I 线	0.149	0.740	0.731	0.735
码开 II 线	0.099	0.722	0.717	0.721
加开 I 线	0.072	0.719	0.714	0.714
加开 II 线	0.400	0.810	0.808	0.813
空开 I 线	0.147	0.731	0.731	0.730
空开 II 线	0.129	0.730	0.725	0.729

仿真模拟结果如图5、图6所示。

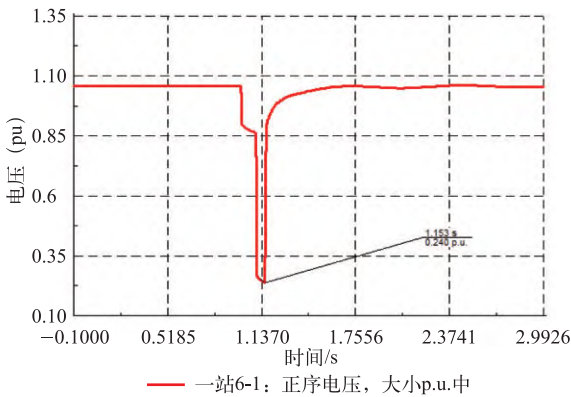


图5 常开 I 线末端三相短路故障仿真波形图—增上发电机

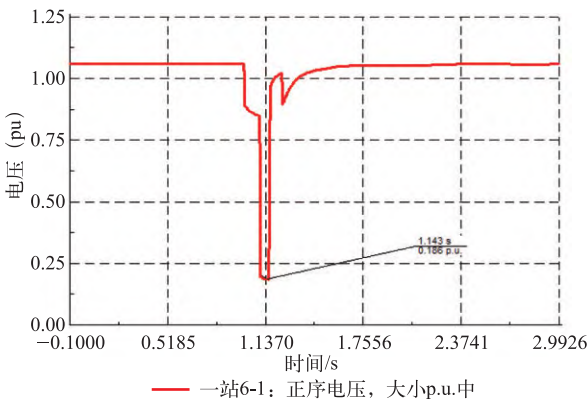


图6 加氢处理 I 线末端三相短路故障仿真波形图—增上发电机

由仿真结果可知，电网整体电压暂降水平有所提高。6 kV电缆发生三相短路故障导致电压暂降

时,新增2台发电机组后故障所在区域6 kV电压水平有所提升。非故障区域6 kV电压水平提升到70%以上。

结束语

本文针对石化企业电压暂降问题进行特征因素分析,根据生产实际构建了复杂的电网仿真潮流模型,通过多组模拟仿真实验对比分析,提出更换高阻抗变压器、FC回路改造及催化机组新增发电机组治理措施。经过电压暂降故障仿真分析可得出,变压器阻抗由8.10%提升至12.00%后,非故障区域6 kV母线平均电压水平由68.33%提升至75.46%,电压水平增幅为7.13%,平均电压水平提升到75%以上。电动机FC回路改造后电压暂降持续时间降低75%。催化新增发电机组后,电网整体电压暂降水平有所提高,新增2台发电机组后故障所在区域6 kV电压水平有所提升,非故障区域6 kV电压水平提升到70%以上。通过工业验证,本文提出的电压暂降治理措施对于支撑石化企业的稳定发展有较大意义。**EA**

(收稿日期:2025-01-15)

参考文献

[1] 张宁,艾鑫,王泽峰.电压暂降对工业厂房内

敏感负荷影响研究[J].智能建筑电气技术,2024,18(3):80-84.

[2] 王灿,周欣,唐星祝,等.大容量电机启动对电网电压暂降的影响分析[J].湖南电力,2016,41(3):12-16.

[3] 彭诚.三相不平衡电压暂降的检测与治理研究[D].成都:电子科技大学,2018.

[4] 唐钰政,李琼林,高健.电压暂降下变频器运行特性研究[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(11):74-82.

[5] 金弘昊.基于动态电压恢复器的敏感设备电压暂降治理研究[D].南昌:南昌大学,2023.

[6] SHAREEF H, MOHAMED A, MARZUKI N. Analysis of personal computer ride through capability during voltage sags[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(12): 1615-1624.

[7] 杜广玉.基于能量函数的电压暂降评估方法研究[D].秦皇岛:燕山大学,2018.

[8] 简建超.电压暂降问题研究现状及面临的挑战[J].供用电,2018,35(2):1-9.

[9] 林邵杰.基于深度迁移学习的配电网电压暂降状态自适应估计方法[D].西安:西安理工大学,2023.

