

考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究

肖湘宁 徐永海 刘连光
(华北电力大学电力系, 102206 北京)

RESEARCH ON MITIGATION METHODS OF VOLTAGE SAG WITH PHASE-ANGLE JUMP

Xiao Xiangning Xu Yonghai Liu Lianguang
North China Electric Power University, Beijing, 102206 China

ABSTRACT The influence of phase-angle jumps associated with voltage sags on the sag mitigation has received a lot of attention in recent years. Hence, an advanced control method that can simultaneously track the phase-angle jumps is essential. Through the fictitious three-phase voltages and the d-q conversion of voltages, a new method that can instantaneously quantify the phase-angle jump, magnitude and duration for single-phase voltage sag is described in this paper. Considering the actual power quality disturbance, the occurrence of the sags and the determination of the voltage injection limitation are discussed also. The proposed method is not only efficient for the evaluation of voltage sags but also the effectively mitigation of the sags when it is used in the series device. Finally, simulation results are presented to demonstrate the validity of the proposed method.

KEY WORDS voltage sag; d-q conversion of voltage; phase-angle jump; voltage sag mitigation

摘要: 近年来, 人们已认识到电压凹陷所伴随的相位跳变对凹陷补偿的影响, 并将其作为衡量电压凹陷的特征量之一。但如何对三相系统中任一相发生电压凹陷时的相位跳变及其它特征量进行实时检测与补偿仍是人们探讨的问题。通过从单相系统到三相系统的构造与电压变换, 本文提出了“瞬时电压 d-q 变换法”, 可对任一相所发生电压凹陷的相位跳变、幅值和起止时刻进行实时检测。结合实际电能质量扰动信号的特征, 给出了判断电压凹陷发生与否以及是否超出补偿装置补偿能力的措施。文中所提方法为凹陷的在线检测与评估及其实时补偿提供了手段, 计算机仿真分析对所提方法的正确性及应用于补偿装置中的有效性进行了验证。

关键词: 电压凹陷 电压 d-q 变换 相位跳变 电压凹陷补偿

中图分类号 TM761 TM712 **文献标识码:** A

1 引言

由于供电网络的复杂性及许多难以预测的原因, 尽管电力部门采取了沿输配电线路的树木维护、加装线路避雷器、清洗绝缘子、加装动物护栏与线路重合闸等预防和清除故障的一系列措施, 但线路故障永远不能完全消除。

基金项目: 国家电力公司重大科技项目 (SPKJ011-08) 和国家电力公司智能保护与控制重点实验室资助项目。

当发生故障, 保护装置跳闸切断给某一用户供电的线路时, 将出现电压间断事件。这种情况一般仅在该线路上发生故障时才会出现, 而相邻或远方线路发生故障时, 则均有可能造成给同一用户供电母线的电压有效值短时间内突然下降的现象, 这种现象即所谓的电压凹陷 (Voltage Sags)。电压凹陷持续时间一般为半个周期到几秒之间, 幅值下降一般为额定值的 10%~90%。与电压间断事件相比, 电压凹陷事件发生的次数更多。

除短路故障引起的电压凹陷之外, 感应电机启动或开关操作等也会引起电压凹陷。目前, 在各用电部

门中复杂电子设备得到了广泛应用，它们对短时间的电压变化较为敏感，电压凹陷是使这些敏感设备不能正确工作的主要原因。所以，采取适当措施，对电压凹陷敏感的关键设备进行保护是非常重要的。在许多国家，电压凹陷已上升为最重要的电能质量问题之一^[1,2]。国外许多专家已开展了对各种方式电压凹陷减缓作用的研究^[3-5]，国内学者也开展了与电压凹陷相关的研究工作^[7,8]。

对电压有效值突然下降的事件，可采用传统有效值计算的方法进行衡量。但有效值计算的实时性较差，同时它不能很明确地给出凹陷起止时刻，更不能反映凹陷电压的相位跳变。将期望的瞬时电压和实际的瞬时电压之间的差值作为凹陷补偿装置应补偿的电压，可解决凹陷的实时补偿问题，即“缺损电压法 (missing voltage technique)”^[4]。但凹陷补偿装置的补偿量超过其本身注入能力时，凹陷的补偿应加以特殊考虑^[5]。因此，反映凹陷电压特征的幅值和相位的瞬时确定不仅对凹陷的瞬时记录与评估，而且对凹陷的实时补偿均具有非常重要的意义^[1,5]。而在“缺损电压法”中，凹陷电压的幅值和相位的瞬时确定仍是需要解决的问题，不可能作到补偿容量的动态控制。采用三相到两相电压变换方法，将变换后的直流分量去除，文献[6]虽然实现了针对三相不平衡且带谐波的电压的补偿，但该文没有涉及电压凹陷补偿时应考虑电压的相位跳变及其影响以及补偿装置注入能力的限制等。从国内外发表的文献看，目前尚未提出对电压凹陷幅值、相位跳变实时检测的有效方法，特别是对单相电压凹陷的实时检测方法。

本文根据实际电能质量扰动信号的属性，考虑高频振荡、噪声以及冲击脉冲等各种扰动特征，提出了对电压凹陷进行评估的“瞬时电压 d-q 变换法”，可对任一相所发生电压凹陷幅值、相位跳变和起止时刻进行实时检测和补偿能力校正。在此基础上，结合“缺损电压法”给出了适用于有源串联电压注入装置的控制策略，较好地解决了电压凹陷的在线检测与评估及其实时补偿问题。

2 电压凹陷特征量的瞬时电压变换检测方法

传统有效值计算方法需利用“历史”数据，由此将引起计算延迟问题。而借助 abc-dq 变换可瞬

时确定电压的有效值。

由于电力系统中可能存在各种各样的扰动，电压波形不可能为理想的正弦波。考虑一般情况，以 a 相为例，设基波相电压有效值为 V 、初相位为 0 。将扰动表示成高频振荡信号的叠加， h 次高频信号的有效值为 V_h 、初相角为 θ_h ，并按指数 $e^{\beta t}$ 衰减。则 a 相电压可表示为：

$$v_a = \sqrt{2}V\sin\omega t + \sqrt{2}\sum V_h\sin(h\omega t + \theta_h)e^{\beta t} \quad (1)$$

由于实际的电压凹陷多为单相事件^[5]，而且很多电压凹陷不仅引起公共连接点电压幅值的降低，还会引起电压的相位跳变^[1,4]。因此，对单相电压进行实时监测，判断是否发生电压凹陷具有非常重要的意义。但前述坐标变换是针对三相电路而言的，不适用于单相电路。考虑到三相三线制电路的特点，以单相电源为参考电压可构造一个虚拟的三相系统。首先，将 v_a 延时 60° 得 $-v_c$ ，然后由 $-v_c = -v_a - v_c$ 算出 v_b 。此时构造三相的延时仅为 60° ， v_b 、 v_c 分别为

$$\begin{aligned} v_b = & -\sqrt{2}V\sin\omega t + \sqrt{2}V\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \\ & - \sqrt{2}\sum V_h\sin(h\omega t + \theta_h)e^{\beta t} \\ & + \sqrt{2}\sum V_h\sin\left(h\omega t + \theta_h - \frac{h\pi}{3}\right)e^{\beta t\left(t - \frac{\pi}{3\omega}\right)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_c = & -\sqrt{2}V\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \\ & - \sqrt{2}\sum V_h\sin\left(h\omega t + \theta_h - \frac{h\pi}{3}\right)e^{\beta t\left(t - \frac{\pi}{3\omega}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

将 abc 电压变换到 dq 轴的关系式为：

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ -\cos\omega t & -\cos(\omega t - 2\pi/3) & -\cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

变换阵 \mathbf{C} 中 $\sin\omega t$ 和 $\cos\omega t$ 是与扰动前 a 相电压同相位的正、余弦信号。

因电压的有效值由 d 轴分量确定，故仅需对 v_b 进行分析。将式 (1) ~ (3) 变换成基波分量和高频分量，代入式 (4)，经过三角函数运算可得：

$$v_d = \sqrt{3}V + \left[\sum V_h \sin\left(\phi_{h-1} + \frac{\pi}{3}\right) e^{\beta_h t} - \sum V_h \sin\left(\phi_{h-1} + \frac{h\pi}{3}\right) e^{\beta_h(t - \frac{\pi}{3\omega})} \right] \quad (5)$$

$$+ \left[\sum V_h \sin\left(\phi_{h+1} - \frac{\pi}{3}\right) e^{\beta_h t} - \sum V_h \sin\left(\phi_{h+1} - \frac{h\pi}{3}\right) e^{\beta_h(t - \frac{\pi}{3\omega})} \right]$$

式中 $\phi_{h-1} = (h-1)\omega t + \theta_h$, $\phi_{h+1} = (h+1)\omega t + \theta_h$

由式(5)可知,电压的基波有效值在 v_b 中表现为直流分量,第 h 次高频振荡信号则变换为 $h \pm 1$ 次高频振荡信号的叠加。因此,当电压中含有较大的扰动时, v_b 不能表示基波电压的有效值,此时应采用滤波技术提取出 v_b 中的直流分量以瞬时获得反映电压的有效值。

当发生无相位跳变电压凹陷时,同样可由式(5)进行分析,通过直流分量的提取求出基波相电压有效值,由有效值的变化判断凹陷的发生与否。

当发生具有相位跳变的电压凹陷时,需对相位跳变大小进行检测。假设对 a 相电压进行实测,并仍采取上述由单相延时的方法构造另两相电压,此时设电压中仍含有如式(1)~(3)中的高频振荡成分,但由于相位跳变的影响,三相电压中基波分量分别变为 $\sqrt{2}V_{sag} \sin(\omega t + \alpha)$ 、 $\sqrt{2}V_{sag} [\sin(\omega t + \alpha - \pi/3) - \sin(\omega t + \alpha)]$ 和 $-\sqrt{2}V_{sag} \sin(\omega t + \alpha - \pi/3)$ 。其中, V_{sag} 和 α 分别为凹陷电压的有效值和相位跳变。

将构造的三相电压按式(4)进行变换,并将变换后 d、q 分量电压中的直流成分 $V_{d\alpha}$ 和 $V_{q\alpha}$ 提取出来,则可得:

$$V_{d\alpha} = \sqrt{3}V_{sag} \cos\alpha \quad (6)$$

$$V_{q\alpha} = -\sqrt{3}V_{sag} \sin\alpha \quad (7)$$

因 $V_{d\alpha}$ 和 $V_{q\alpha}$ 经实测计算为已知量,则由式(6)和(7)可求出凹陷电压的幅值和相位跳变为:

$$V_{sag} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{V_{d\alpha}^2 + V_{q\alpha}^2} \quad (8)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}V_{d\alpha}}{3V_{sag}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{V_{d\alpha}}{\sqrt{V_{d\alpha}^2 + V_{q\alpha}^2}}\right) \quad (9a)$$

或

$$\alpha = \sin^{-1}\left(-\frac{\sqrt{3}V_{q\alpha}}{3V_{sag}}\right) = \sin^{-1}\left(-\frac{V_{q\alpha}}{\sqrt{V_{d\alpha}^2 + V_{q\alpha}^2}}\right) \quad (9b)$$

3 有源串联电压注入方式的控制

采用电力电子换流器构成的电能质量补偿装置可分为并联型和串联型。并联型装置可补偿无功功率和谐波等,同时对电压凹陷也有一定的补偿作用^[1]。与并联型装置相比,串联型装置对电压凹陷具有更好的补偿效果。除此之外,串联型装置还可对电压波动等进行补偿,或使其作为有源滤波器运行,对谐波进行补偿。通过适当控制,在需要的情况下同一串联补偿装置可对多种扰动进行综合补偿,其原理性接线图如图1所示。

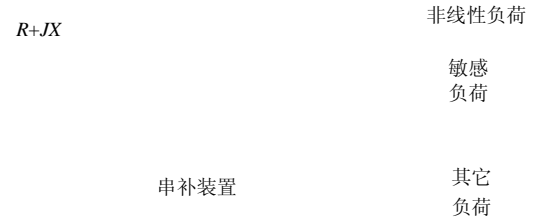


图1 串联补偿装置原理接线图

Fig.1 Diagram of an series device for a distribution system

3.1 注入电压

串联装置的无功补偿容量通常可用其所能注入的电压有效值的百分比衡量^[5]。为使补偿电压在实际装置注入能力限制之内,需要对其大小实时监测。设发生电压凹陷前后的电压均为理想的正弦波,分别为:

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t - \phi_a) \quad (10)$$

$$v_{sag} = \sqrt{2}V_{sag} \sin(\omega t - \phi_b) \quad (11)$$

式中 V 、 V_{sag} 和 ϕ_a 、 ϕ_b 分别是凹陷前电压和凹陷电压的幅值和相角。

此时,应补偿电压为同频的正弦波,其有效值为:

$$V_c = \sqrt{V^2 + V_{sag}^2 - 2VV_{sag} \cos\alpha} \quad (12a)$$

式中 $\alpha = \phi_b - \phi_a$ ，为电压相位跳变。 α 可由式

(9a) 确定， V_c 也可表示为：

$$V_c = \sqrt{V^2 + V_{sag}^2 - 2VV_{d\alpha} / \sqrt{3}} \quad (12b)$$

应补偿电压的相角 ϕ_c 由下式确定：

$$\phi_c = \text{tg}^{-1} \left(\frac{V \sin(\phi_a) - V_{sag} \sin(\phi_b)}{V \cos(\phi_a) - V_{sag} \cos(\phi_b)} \right) \quad (13)$$

式 (12a)、(12b) 和 (13) 中的 V_{sag} 可由式 (8)

求出。

3.2 控制措施

对于电压凹陷的补偿，关键是要检测出凹陷的起止时刻、幅值与相位跳变，而有效值的突然变化是发生凹陷的主要标志。但由以上分析可知，当考虑电力系统中存在的扰动时，变换后的 d、q 分量电压也存在扰动。为消除高次谐波和高频暂态的影响，同时避免在电压有效值变化较小时出现不必要的补偿（实际上由于补偿装置的响应时间限制，这些扰动也很难得到补偿^[5]），可采用低通滤波器（LPF）将 d、q 分量电压中的直流成分提取出来，通过与式 (8) 同样的关系对电压有效值进行计算，以判断是否发生电压凹陷。若发生电压凹陷，则通过式 (12b) 计算补偿电压有效值，进一步判断补偿装置的凹陷补偿能力。若未超出补偿装置的补偿能力，则将期望电压与实测凹陷电压之间的差值即“缺损电压”作为凹陷补偿装置的补偿电压；若超出补偿装置补偿能力，则可采用不同的控制原则，如使补偿后电压有效值最大的方法等^[5]。

图 2 给出了单相控制电路的框图，对三相系统只需采用三组相同的控制电路即可。

图 2 中对电压凹陷发生与否的判断，是将低通滤波后所求取的电压有效值与设定阈值比较进行的，若比值超出阈值，则表明已发生电压有效值较大的变化，为减少滤波器延迟效应带来的影响，提高动态响应速度，此时可先启动补偿，然后再进行校正（校正环节如图 2 虚框中所示）。启动补偿时可先将“缺损电压”与补偿装置允许的最大补偿电压值进行比较，以决定采用“缺损电压”或简单按某一小于最大补偿电压的值作为补偿信号。在随后的校正中，利用滤波

后的 $V_{d\alpha}$ 和 $V_{q\alpha}$ 计算 V_{sag} 和 α ，判断补偿装置的凹陷补偿能力，进而决定采用“缺损电压”的全补偿或不完全补偿。当进行全补偿时，“缺损电压”为 $v_{aref} - v_a$ ，其中 v_{aref} 为理想参考电压（此时对伴随电压凹陷产生的其它扰动如谐波等也同时进行补偿）。不完全补偿时，则可利用 V_{sag} 和 α 等信息进行补偿原则的选择。

补偿信号确定后，通过对串补装置中开关器件进行 PWM 控制，可使电压凹陷得到补偿。

4 仿真研究

对某一相电压有效值为 220V、频率为 50Hz 的三相系统进行了计算机仿真研究。仿真中 LPF 选用 2 阶、截止频率为 100Hz 的 Butterworth 滤波器。补偿装置采用单相全桥逆变器结构，开关切换采用单电压极性 PWM 控制方式，逆变器输出电压经滤波后通过串联变压器注入系统。

4.1 非凹陷扰动

图 3 给出了未发生电压凹陷，但当某一相电压出现高频暂态振荡时，采用与式 (8) 同样的关系对滤波前后电压分量的计算结果。

由图 3 (b) 可知，在高频振荡扰动情况下，滤波前波形有较大幅度的变化，这与电压的瞬时变化相对应，但由于其变化快、时间短，难以利用串联补偿装置进行有效补偿^[6]，因此，对这样的扰动电压，应控制补偿装置不进行补偿。但若我们以其作为控制信号时，由于其较大的变化，可能导致装置误动。图 3 (c) 为图 3 (b) 滤波后的波形，对应电压有效值变化，其波形较平稳，变化幅度较小。

对其它属性的电能质量扰动，如脉冲冲击扰动等，也可得到与高频振荡扰动相似的结果。所以，当以滤波后的电压有效值作为控制信号，并规定其在一定范围内变化时补偿装置中开关不动作，则可以保证补偿装置安全可靠地工作。

4.2 凹陷扰动

设某一相的电压在 0.06s~0.1s 之间发生具有 -30°

相位跳变、50%的凹陷，且凹陷期间凹陷电压为非正弦波，如图 4 所示。

从图 4 (d)、(e) 可见，发生凹陷扰动时与电压有效值对应的电压均骤然下降。为正确判断凹陷并兼顾补偿的快速性，仿真中设定当 V_{sag} 下降到正常情况下额定值的 90% 为启动阈值，并启动补偿装置开始补偿。图 4(g) 给出了应补偿电压的有效值 V_c ，约为 136V。

由图 4 (e)、(f) 可看出，凹陷电压的有效值为 110V，相位跳变为 -30° 。即表明发生了具有 -30° 相位跳变、50% 的电压凹陷，这与设定的凹陷完全相符。

图 4 (b)、(c) 和 (a) 分别给出了补偿装置应补偿电压、补偿电压及补偿前后电压的波形。从图 4 (a) 可看到，经短暂延迟与过渡之后，凹陷电压的相移、幅值与畸变得到了完全补偿。本例中， V_{sag} 下降到正常情况下稳态值的 90% 时约需 2.3ms。

图 4 (a) 所示为对凹陷电压全补偿时的情况，当

串联补偿装置的补偿能力受限，如只有 50% 额定电压有效值补偿能力时，则不能得到图 4 (a) 所示的补偿效果。在凹陷发生后约 2.3ms， V_{sag} (见图 4 (e)) 下降到正常情况下额定值的 90%，此时认为发生电压的凹陷，启动补偿装置开始补偿，补偿开始时的全补偿信号如图 5 (b) 中波形 1 所示。但补偿装置仅有 50% 补偿能力，因此，通过简单地按某一小于最大补偿电压的值作为补偿信号，从而使实际补偿电压如图 5 (b) 中波形 2 所示。在约 4.3ms 时， V_c 上升到 110V，进一步说明应补偿信号超出了补偿装置的补偿能力。此时，采用使电压有效值最大的补偿方法，即利用检测到的电压相位跳变，令补偿电压为与凹陷电压同相位、幅值为 50% 额定电压有效值的纯正弦波，补偿前后的电压波形如图 5 (a) 所示。须注意，图 5 (a) 中电压幅值得到充分补偿，但补偿后的电压与凹陷电压同相位，仍含有畸变。

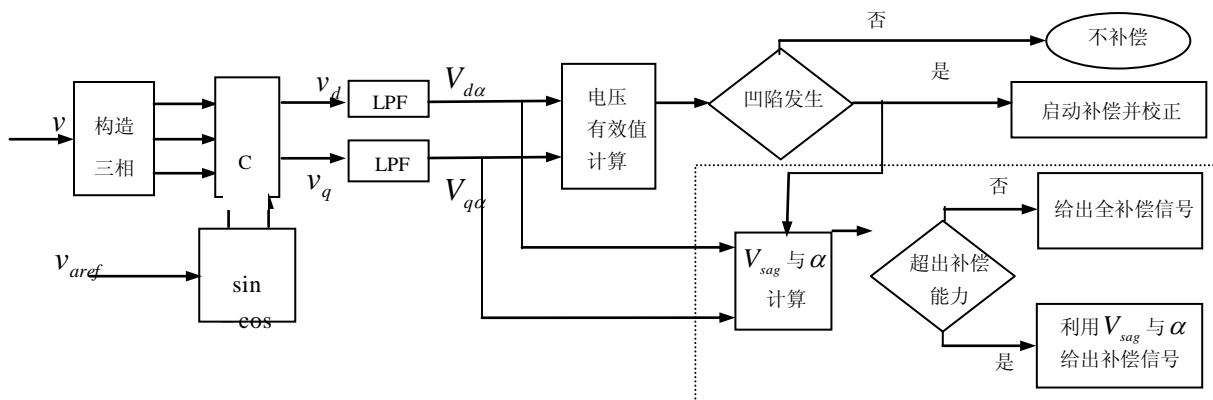


图 2 电压凹陷单相控制原理框图

Fig.2 Simplified single phase control block scheme of voltage sag

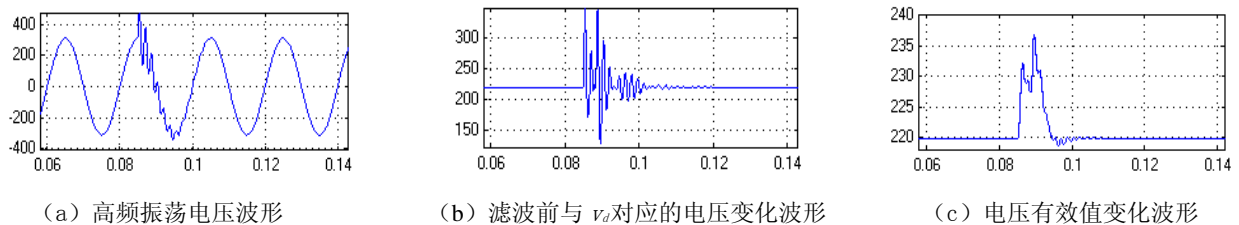
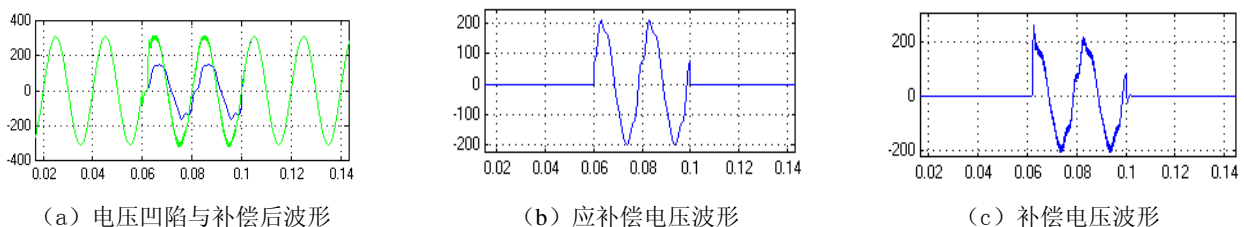


图 3 高频振荡扰动

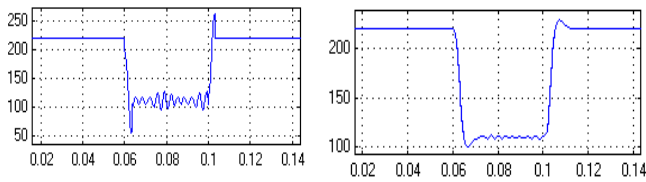
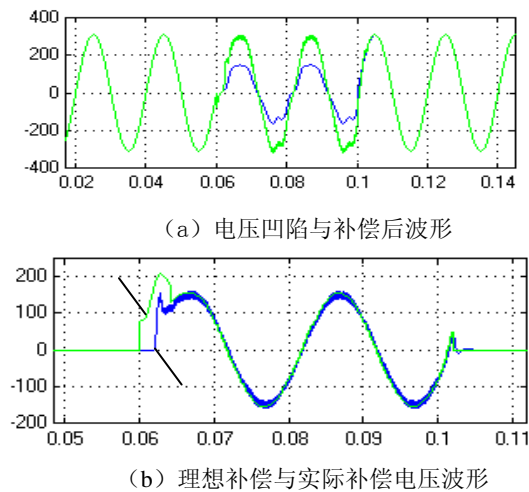
Fig.3 High frequency oscillatory transient



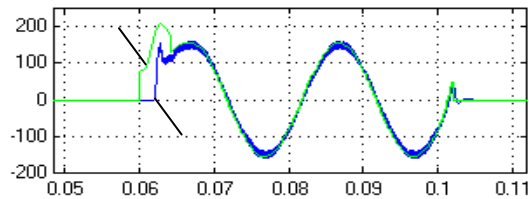
(a) 电压凹陷与补偿后波形

(b) 应补偿电压波形

(c) 补偿电压波形

(d) V_{sag} 滤波前波形(e) V_{sag} 波形(f) 相位跳变 α 波形(g) V_c 波形图4 -30° 相位跳变 50%畸变凹陷波形Fig.4 50% distorted sag with -30° phase angle jump

(a) 电压凹陷与补偿后波形



(b) 理想补偿与实际补偿电压波形

图5 电压凹陷与不完全补偿时补偿后波形

Fig.5 Voltage sag mitigation with 50% injection limitation

在本文所选低通滤波器参数下, 对不同幅值和相位跳变的电压凹陷的仿真分析表明, V_{sag} 下降到正常情况下额定值的 90% 时所需时间在 2ms~5 ms 之间,

V_c 上升到稳态值的时间在 5ms~10ms 之间。凹陷的启动补偿是以 V_{sag} 为标志的, 并由 V_c 和相位跳变进行校正。因此, 本文所提方法具有良好的动态响应性。

5 结论

本文通过对扰动电压进行 d-q 变换, 给出了凹陷幅值、相位跳变与电压 d、q 分量的关系, 经低通滤波后可正确判断是否发生电压凹陷。本文所提出的对任一相所发生电压凹陷幅值、相位跳变和起止时刻的实时检测方法, 克服了传统电压凹陷有效值计算方法的缺陷, 对凹陷的在线检测与评估及其实时补偿均具有非常重要的意义。

在给出串联补偿装置补偿电压控制措施之后, 通过计算机仿真对非电压凹陷扰动与电压凹陷扰动及其补偿进行了分析, 验证了所提方法的正确性。

参考文献

- 1 Wang P, Jenkins N, Bollen M H J. Experimental Investigation of Voltage Sag Mitigation by an Advanced Static VAR Compensator. IEEE Trans. on Power Delivery. 1998, 13(4): 1461—11467
- 2 Chan K, Kara A. Voltage Sag Mitigation with an Integrated Gate Commutated Thyristor Based Dynamic Voltage Restor. Proceedings of the IEEE ICHQP VIII, Athens, Greece, 1998: 561—565
- 3 Heydt G T, Tan W, LaRose T, Negley M. Simulation and Analysis of Series Voltage Boost Technology for Power Quality Enhancement. IEEE Trans. on Power Delivery. 1998, 13(4): 1335—1341
- 4 Tunaboylu N S, Collins, Jr E R, Chaney P R. Voltage Disturbance Evaluation Using the Missing Voltage Technique. Proceedings of the IEEE ICHQP VIII, Athens, Greece, 1998: 577—582
- 5 Middlekauff S W, Collins, Jr E R. System and Customer Impact: Considerations for Series Custom Power Devices. IEEE Trans. on Power Delivery. 1998, 13(1): 278—282
- 6 S.-Y.Lee, Y.-M.Chae et al. A New Control Strategy for Instantaneous Voltage Compensator Using 3-phase PWM Inverter. Proceedings of the IEEE PESC, 1998
- 7 刘汉奎, 顾建军, 徐殿国, 王炎(Liu Hankui, Gu Jianjun, Xu Dianguo, Wang Yan). 高性能串联型三相交流电压调节装置的研究(Research on High Performance Series Three-Phase AC Voltage Regulator). 电力电子技术(Power

Electronics), 1999, 33(6):19~22

- 8 伍家驹, 刘桂英, 王牛保, 曾小华(Wu Jiaju, Liu Guiying, Wang Niubao, Zeng Xiaohua). 瞬间电压降补偿器的研制 (Development of the Instantaneous Voltage Drop Compensator). 电力电子技术(Power Electronics), 1999, 33(6):7~10

作者简介

肖湘宁 男, 1953 年出生, 教授, 博导。主要从事电力系统谐波、电能质量、现代电力电子技术及其应用等方面的教学与科研工作。

注: 该文章发表于 2002 年 1 月<中国电机工程学报>Vol. 22 No. 1 Jan. 2002