

## ▪ **Einflüsse auf das Energieaufnahmevermögen von Metalloxidableitern**

**Dipl.-Ing. Thomas Klein**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. J. H. Werner  
Tag der mündlichen Prüfung: 04.02.2004

Metalloxidableiter bieten gegenüber den Schutzeinrichtungen mit Funkenstrecken bezüglich ihres Ansprechverhaltens erhebliche Vorteile. Im Überspannungsfall bricht die Spannung nicht zusammen, sondern stellt sich, entsprechend ihrer nichtlinearen Kennlinie, auf eine die Betriebsspannung übersteigende Restspannung ein. Bei energiereichen Überspannungsereignissen führt der dadurch entstehende hohe Energieumsatz im Ableiter zur starken Erwärmung der Keramik. Dies kann zur sofortigen mechanischen oder thermischen Zerstörung des Ableiters führen. Überspannungsereignisse mit geringerer Energie beeinflussen die elektrischen Eigenschaften der Metalloxidkeramik und nehmen so Einfluss auf sein Energieaufnahmevermögen bei zukünftigen Belastungen.

In der vorliegenden Arbeit wird hauptsächlich der zweite Fall, also die Schädigung des Ableiters durch Impulsströme untersucht, nicht dessen sofortige Zerstörung. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Energien der zur Verfügung stehenden Stoßstromanlagen nicht ausreichen, um Ableiter oder einzelne Varistorscheiben mit praxisrelevantem Durchmesser zu zerstören. Aber auch bei geringeren Energien treten mechanische Schädigungen in Form von Rissen in der Keramik auf. Die Ausprägung und ihr Einfluss auf den Weiterbetrieb des Ableiters hängen von der Impulsenergie sowie von der Stromsteilheit ab.

Wesentlich empfindlicher sind die elektrischen Kenndaten des Ableiters. Zur Auswertung dieser werden alle Varistorscheiben vor und nach ihrer Belastung mit einer vorgegebenen Referenzstromdichte, die im Betriebsbereich liegt, geprüft. Veränderungen der Kennlinie äußern sich durch Asymmetrie des Referenzstromes und durch Absinken bzw. Ansteigen der Spannung (Referenzspannung), die beim Fließen des Referenzstromes anliegt.

Durch Belastung mit Einzelimpulsen unterschiedlicher Form – 4/10, 8/20, 30/60 – werden die Einflüsse von Impulsenergie, Stromsteilheit und Amplitude untersucht. Mit zunehmender Stromsteilheit steigt die Asymmetrie des Referenzstromes und die Referenzspannung nimmt ab. Hohe Impulsenergien schwächen die entstandene Asymmetrie der Kennlinie ab. Dieser Effekt ist Regenerationsprozessen zuzuschreiben, die mit steigender Temperatur ausgeprägter werden. Bei der Referenzspannung kann dies nicht beobachtet werden. Diese sinkt mit steigender Impulsenergie ab.

Abhängig vom Anwendungsbereich gibt es Varistoren mit unterschiedlichen Feldstärken. Je größer diese ist, desto höher ist der Energieumsatz im Varistor bei vorgegebener Impulsstromdichte. Um die thermische Stabilität des Ableiters bei hohen Impulsenergien zu erhalten, müssen entsprechend größere Varistordurchmesser gewählt werden. Bezüglich der Veränderung elektrischer Kenndaten ist dieser Zusammenhang nicht gegeben. Das Absinken der Referenzspannung bei gleicher Impulsstromdichte reduziert sich mit zunehmender Feldstärke des Varistors. Geht man davon aus, dass Ableiter in der Praxis äußerst selten bis zu ihrer thermischen Stabilitätsgrenze belastet werden, sind mit der Wahl höherer Feldstärken Materialeinsparungen möglich.

Untersucht wird auch der Einfluss der Varistorgeometrie auf das Verhalten der elektrischen Kenndaten. Abhängigkeiten vom Durchmesser der Varistorscheibe, das heißt Sättigungserscheinungen, treten nicht auf. Die Höhe der Varistorscheibe spielt jedoch eine Rolle. Mit zunehmender Varistorhöhe sinkt die Referenzspannung stärker ab. Größere Stromsteilheiten verstärken den Effekt. Ursache dafür ist die Heizrate, was dem Temperaturgradient in der Keramik entspricht. Mit seinem Anstieg wachsen die thermomechanischen Spannungen, die zur Schädigung des Varistors führen. Bei geringer Höhe sind diese weniger kritisch.

Mit der Belastung der Varistoren durch multiple Impulse werden die in der Praxis auftretenden Beanspruchungen durch Folgeblitze nachgebildet. Die Impulssequenzen setzen sich aus maximal 6 Impulsen wählbarer Polarität und Impulsform zusammen. Ein Zusammenhang der elektrischen Kenngrößen der Varistoren mit den Zeitabständen zwischen den Impulsen kann nicht nachgewiesen werden. Die Belastung mit multiplen Impulsen ist für die Varistorkeramik aufgrund der gegenüber den Einzelimpulsen wesentlich niedrigeren Stromamplituden weniger kritisch. Der Varistor ist somit in der Lage, größere Energien aufzunehmen. Die damit verbundene hohe Keramiktemperatur unterstützt Regenerationsprozesse, die zur Erholung der Kennlinienveränderungen führen. Bei wechselnder Polarität des Stromes innerhalb einer Impulsfolge findet bei ausreichend hoher Keramiktemperatur eine Konditionierung statt, was zu einer Verbesserung des Kennlinienverlaufs gegenüber dem Neuzustand führt.

Während bei Beanspruchungen mit Einzelimpulsen die hohen Stromamplituden und Steilheiten die Varistoren schädigen, tritt bei multiplen Impulsen die dielektrische Belastbarkeit der Mantelfläche in den Vordergrund. Mit steigender Keramiktemperatur sind verstärkt Außenüberschläge zu beobachten. Durch den Einsatz von Materialien zur Ummantelung, deren Spannungsfestigkeit bei hohen Temperaturen weniger stark abnimmt, kann die Energieaufnahme gesteigert werden. Da die vollständige Aufheizung der Ummantelung auf die Keramiktemperatur einige 10 ms in Anspruch nimmt, treten bei Impulssequenzen mit kleinen Zeitabständen weniger Außenüberschläge auf.

Zum Verständnis der Funktionsweise von Metalloxidvaristoren werden der Aufbau der Zinkoxidkeramik und die Vorgänge an den Korngrenzen diskutiert. Bei der theoretischen Erklärung der Versuchsergebnisse wird der Einfluss der negativ geladenen Sauerstoffionen an den Korngrenzen immer wieder deutlich. Durch Bewegung dieser ins Korninnere sinkt die Nichtlinearität der Kennlinie und Asymmetrien treten auf. Beides lässt sich aus den Veränderungen an den Korngrenzbarrieren ableiten.

In Wechsellspannungsversuchen wird der Einfluss der Kennlinienveränderungen auf das Betriebsverhalten von Varistoren und vergossenen Ableitern untersucht. Vor allem der Einfluss auf die thermische Stabilität spielt eine zentrale Rolle. Neben den elektrischen Eigenschaften wird diese durch den geometrischen Aufbau und das Gehäusematerial bestimmt. Die Messergebnisse sind dadurch nicht auf andere Ableiteranordnungen übertragbar.

## ▪ **Influences on the Energy Absorption Capability of Metal-oxide Arresters**

**Dipl.-Ing. Thomas Klein**

Surge arresters are used for overvoltage protection at all power system voltage levels. Depending on the origin, the overvoltages are characterised by high energy, long duration or a large steepness of the discharge current.

Because of the high non-linear current/voltage-characteristic of modern zinc-oxide varistors, a serial spark gap to prevent leakage current, as used in SiC arresters, is not necessary. But therefore it is important to detect mechanical and electrical damages of the ceramic. High energy injections caused by overvoltages can result in an immediate thermomechanical destruction of the varistor ceramic. But also surges with less energy may degrade the electrical characteristics, increase the power dissipation and thus reduce the energy absorption capability of the surge arrester. This point is mainly considered in the following. Therefore significant electrical characteristics have to be evaluated before and after the impulse stress. There are also superficial features, such as cracks on the surface of the varistor.

### **Microstructure of metal-oxide resistors**

To understand the electric behaviour of varistors, the microstructure of the ceramic has to be explained, especially the effects at the grain boundaries.

The basic material for the metal-oxide resistor is pulverised zinc-oxide with about 10 additional doping elements. The powder is mixed in several processing steps and then compressed into disc-shaped blocks. By a sintering process, the block is further densified into a ceramic body. At the high sintering temperatures of about 1200 °C the adjacent powder particles are united and grow into large grains. This grain growth can be influenced by the temperature profile during the sintering process and by the

doping elements. While the ZnO grains have a high electrical conductivity, the non-linear behaviour of the resistor is caused by the boundaries between these grains. Each boundary represents a small varistor with a breakdown voltage of 3,5 V. Thus the whole ceramic is a network of micro-varistors connected together in series and parallel. The band diagram shows the varistor effect at the boundaries. The negative charged oxygen ions, fixed at the grain boundaries initiate a band bending as known from a double Schottky barrier. The shape of this potential barrier, that means height and width, is responsible for the V/I- characteristic and its non-linearity. Several studies have investigated the correlation between the electrical properties and the oxygen content of the grain boundaries. With decreasing oxygen coverage at the interfaces, the barrier height is reduced. This reduction is mainly the result of thermal ageing or even stronger due to electrical stresses such as high impulse currents.

### **Test samples and experimental procedure**

For the experiments two impulse current generators are available. The first generator is for single impulses and has a stored energy of 80 kJ. With the second one impulse sequences consisting of six or less impulses can be generated. The total energy content is 150 kJ. The amplitude, the waveshape and the polarity of the current impulse can be changed within one sequence. The time delay between the impulse is adjustable. With both generators impulses of the waveshapes 4/10, 8/20 and 30/60 can be obtained, which are used for the tests. Depending on the residual voltage of the test sample, single pulses with amplitudes of 200 kA and multiple pulses with 60 kA can be generated. In spite of the high energy stored in the generators it is not possible to study arresters with a residual voltage higher than 40 kV. Therefore only single varistor disks with different heights and diameters are used. In order to avoid surface flashovers during the impulse stress the varistors and the electrodes are coated with thermo-shrinkable plastic tubes. A possibility to carry out the tests without these tubes is the use of field-controlled electrodes which reduce the electric field strength at the contact surfaces. This arrangement is mainly used for multiple pulses with lower current amplitudes.

To detect changes in the electrical characteristics, it is necessary to measure significant data before and after the impulse stress. On the one hand these data have to represent the actual state of the varistor, but they also have to be sensitive enough to detect little changes in the characteristics. Therefore a reference current at a voltage exceeding the operating voltage by 20 %, is measured. This level is called the reference voltage. Thus the resistive part of the current increases and the measurement becomes more sensitive to changes. Damages are then indicated by an increasing current if the reference voltage is kept constant or by a reduced voltage if the reference current is kept constant. Both methods are used. Because of the temperature dependence of this measurement, it is done at a constant temperature of 30 °C.

To investigate the effects of impulse stresses on the operational behaviour of the arrester, ac-measurements with new and damaged test samples are made. In a climatic chamber at constant ambient temperature the temperature development of varistors and silicone housed arresters is observed. The surface temperature of the ceramic is measured with an infrared thermometer.

### **Results of stresses with single impulses**

First, the dependence of the electrical characteristics on the energy density and current density of the current impulses is shown. Starting at a constant value of the reference current, the reference voltage is dropping in a linear manner with increasing energy and current density of the impulse. This phenomenon also depends on the waveshape of the impulses. The measurements are done with 4/10, 8/20 and 30/60 impulses. It is shown, that with increasing current steepness the reference voltage drops stronger. Looking at the symmetry of the reference current, the asymmetry increases with the energy density of the impulse. After a certain maximum is obtained the asymmetry is reduced again. The energy density referring to this maximum is independent of the impulse waveshape, but it is more distinct at a higher current steepness.

To get more information about the cause of these changes, one cycle of the reference current is regarded. Thus the reducing effect of current impulses with high steepness and energy density on the nonlinearity factor  $\alpha$  of the varistor becomes evident.

Also varistors with different electric field have been investigated. One of the main results was, that varistors with higher electric field strengths have a smaller reduction of the reference voltage. It also can be shown, that changes in the nonlinearity of the V/I-characteristic are stronger at lower field strengths.

Apart of these effects the geometric data of the varistor disk also has some influence on the behaviour of impulse stressed varistor characteristics. With increasing diameter there are no saturation effects detectable but with larger heights of the disk the reduction of the reference voltage becomes stronger. This fact depends on the current density and steepness of the stressing impulse. The reason for this is given by thermomechanical stresses in the ceramic. They increase with the current steepness and the height of the varistor.

### **Results of stresses with multiple current pulses**

In this part of the investigations only impulses with the waveshape 4/10 are used. Generally the impulse sequences consist of 6 single pulses. The time delays between them vary, but they are constant within one sequence. It is important that they don't exceed the limitations given by the adiabatic heating of the varistor disk. Due to the lower amplitudes and current steepnesses, the energy input into the ceramic material is the critical factor.

Several tests showed, that there is only little influence of the time delays between the impulses on the change of the characteristics. But with longer delay times the probability of a surface flashover increases. The rate of surface flashovers can be influenced by the coating material. It depends on its flashover field strength and the corresponding temperature coefficient.

If the current polarities change within one sequence, the influence on the characteristic of the varistor is connected with their temporal order. The last impulses are dominating. Smaller changes are obtained with alternating polarity. Depending on the energy content of the impulse sequence, an improvement of the characteristic can be realised. The power loss reduces as a result of a slight rise of the nonlinearity and asymmetries, caused by preceding impulses disappear. The reason for these phenomena which do not occur at single pulse stresses is the heating of the ceramic during the impulse sequence.

The results of these investigations show, that multiple pulse stresses don't cause larger damages than single pulses. Changes produced by an impulse current are not intensified by following identical impulses. They are even attenuated by multiple pulses where the time delays are too short for a cooling down of the ceramic.

### **Mechanical damages of the ceramic**

As mentioned in one of the first paragraphs, stresses with impulse currents can also cause mechanical damages in the ceramic. There are three different kinds of cracks on the surface of the varistor – azimuthal, radial and axial, while it is not possible to connect them with amplitude, current steepness or energy content of the different stresses. Generally, cracks become larger with increasing current steepness, but it is hardly possible to classify them into severe and uncritical ones.

Another possibility to evaluate the energy capability of varistors is to determine the limit of a mechanical destruction of the ceramic. This is the most significant feature, but it is impossible to destroy varistor disks of larger diameters with the used current generators.

### **Conclusions**

Measurements with varistors of different manufacturers show, that the changes in their V/I-characteristic differ. They depend on the chemical compound and the manufacturing process. But the tendencies, like the reduction of the reference voltage or the increasing asymmetry are always the same.

For the service operation of surge arresters it is important to know the influence of these changes on their energy absorption capability. Therefore the temperature development of new and aged varistors and silicone sealed arresters are tested at their operating voltage.

With dropping reference voltage of the varistors, an increase of the ceramic temperature due to the larger power dissipation can be observed. But even with damages in the characteristic that cause a reduction of the reference voltage of more than 15 % the thermal stability of the varistor and the silicone housed arrester was not endangered. These measurements have been carried out for ambient temperatures of 20 °C and 40 °C.

Normally, arresters stressed by overvoltages are loaded with their operating voltage immediately after the surge. Because of their heating, the leakage current and the power dissipation is increased. Additionally, the discharge current causes a further increase of leakage current due to the damage of the characteristic and the reduction of the non-linearity.

Experiments demonstrate, that the combination of the high ceramic temperature and the operating ac-voltage reduces the pulse stress induced increase of the power dissipation so that the varistor recovers and cools down.

Measurements of the reference data before and after the impulse stress and finally after the ac test show this recovery process that improves the damaged V/I-characteristic.

For both set-ups, the varistor with its electrodes and also the silicone sealed arrester, there is a limit of the ceramic temperature, at which a further increase causes thermal instability. This limit is for both setups at 320 °C.

But this value is only valid for this special arrangement. Larger arresters with reduced thermal diffusion through the electrodes will have a lower limit.