第9回

4　パルスパワー計測

4.1　パルス高電圧測定

4.2　パルス大電流測定

キーワード

抵抗分圧器, コンデンサ分圧器, ロゴスキーコイル, 外部積分・自己積分, 同軸分流器

4　パルスパワー計測

特徴

・高速, 高電圧, 大電流

・電磁気的測定と光学的測定

・ノイズ対策とシールド技術が必須

・電磁気的測定（低電圧に変換）

・光学的測定（〃＋ノイズの影響排除）

・シールドとノイズキャンセリングが必須

4.1　パルス高電圧測定

特殊性

・絶縁確保のため大型化し高速化に難

・コロナ放電の発生を避ける広い空間が必要

・測定のための電流による損失, 発熱に注意

・被測定対象への影響低減が重要

・簡易かつ安価ではない

・校正が必要でしばしば困難

抵抗分圧器

・高周波特性の補正が必要

・市販品：補正回路付, 分圧比・ケーブル長制限

高圧側

・高耐圧, 低インダクタンス

・グラファイト粉末＋エポキシ樹脂等

低圧側

・低インダクタンス

・測定線とのインピーダンス整合

・金属被膜抵抗等

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_0 \text{，} R_1 + R_2 \gg R_L$$

電解液式抵抗分圧器:

・硫酸銅水溶液等

・高周波特性良好

・一般に分圧比および抵抗値が小

・電解液濃度によって抵抗値を可変

・低インダクタンスで許容電力量が大

・溶液抵抗が変化しても分圧比一定

コンデンサ分圧器

原理, 構造と特徴

・被測定物 R_L と並列接続

・高圧側 C_1 と低圧側 C_2 で分圧

・一般に高周波特性良好

・直流電圧が計測不可

$$V_{out} = \frac{C}{C_2} V_0 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_0 \text{，} C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

・キャパシタンスの決定条件

(1) 分圧器接続による負荷への影響低減

分圧器に流れる電荷量 ≪ 負荷に流れる電荷量

測定パルス幅 τ_p とすると $CV_0 \ll \frac{V_0}{R_L} \tau_p$ または,

$CR_L \ll \tau_p$

(2) 低圧側コンデンサの電荷保存条件

測定回路の抵抗値により測定パルス時間内で電荷が変化しないことから,

$C_2 V_{OUT} \ll \frac{V_{OUT}}{R_t} \tau_p$ または, $CR_2 \gg \tau_p$

コンデンサ分圧器の実装例
・高圧側コンデンサ C_1 : 高電圧側導体と中間導体間の静電容量,
・低圧側コンデンサ C_2 : 中間導体とケース間の絶縁物の静電容量
・C_2 の電圧は，R_1 R_2 より，同軸ケーブル出力
・R_1 は（漏れインダクタンスと対地容量による）振動抑制
・R_2 は出力抵抗
・高周波特性の良好な分圧器を実現するには，低圧側のインダクタンス成分を極力小とする
・C_1 が実測できない場合は，分圧特性既知の分圧器で校正

測定対象と測定点間のインダクタンスの影響
分圧器測定電圧と実負荷電圧との関係は

$$V_{\mathrm{out}} = L\frac{dI}{dt} + V_{\mathrm{load}}$$

よって，残留インダクタンスと電流波形の微分値との積を測定電圧から差し引くことが必要。

4.2 パルス大電流測定
ロゴスキーコイル (Rogowski coil)
被測定電流の変化による，環状ソレノイドの断面を通過する磁束変化を測定する。ソレノイドの 1 周を通る磁束で測定誤差が発生するため巻き戻しを行う。この結果被測定電流がトーラスに交差する方向や形状によらない。またコイルもトーラス形状に限らず，扁平型など被測定電流を囲む形状であれば自由に選択することができる。

ピックアップコイル
測定電流のまわりにコイルをおけない場合などは，電流が作る磁束の一部を計測することで，全電流を推定することができる。このような場合にはピックアップコイルが良く使用される

$$V = \frac{\phi}{RC} = \frac{\mu_0 NAI}{2\pi r}\frac{1}{RC}$$

同軸分流器

$$V = RI + L\frac{dI}{dt}$$

回路に直列に挿入して計測する方法で，絶対値計測に適するが，回路挿入による抵抗の増加を防ぐため極力小さな抵抗にする必要があることと，インダクタンス成分を減らすために同軸構造にしなくてはいけない。回路方程式は単純で次式となる，測定抵抗としてはステンレス箔などが大電流測定に用いられる。

・外部積分型:

自作簡単，RC は外付け積分回路，低周波向き

ϕ をコイルとの鎖交磁束，ω を被測定電流のフーリエスペクトル角周波数とすれば

$$\frac{d\phi}{dt} = L\frac{di}{dt} + (r+R)i + \frac{1}{C}\int_0^t idt$$

両辺を R でわる

$$\frac{1}{R}\frac{d\phi}{dt} = \frac{L}{R}\frac{di}{dt} + \left(\frac{r}{R}+1\right)i + \frac{1}{RC}\int_0^t idt$$

ここで，$r \ll R$, $\frac{1}{RC} \ll \omega \ll \frac{R}{L}$ とすると，

$i = \sin\omega t$ と考えれば，

$$\frac{L}{R}\frac{di}{dt} = \frac{L}{R}\omega\cos\omega t \ll 1,$$

$\frac{1}{RC}\int_0^t idt = \frac{-1}{RC\omega}\cos\omega t \ll 1$ だから無視して，

$i \cong \frac{1}{R}\frac{d\phi}{dt}$ となる。以上から出力電圧は

$$V = \frac{1}{C}\int_0^t idt \cong \frac{\phi}{RC}$$

ここで，ϕ は被測定電流 I とコイルターン数 N ，コイル形状と電流分布などによる定数 K により定まり $\phi = KNI$, よって $V = \frac{KN}{RC}I$

積分器出力電圧波形から被測定電流波形が換算できる。通常 K は既知の分圧器との比較もしくは計算求まる電流波形との対比から求める。また $\omega \ll R/L$ より測定可能周波数上限がある。

・自己積分型:

市販のカレントモニター，高周波向き

$$\frac{d\phi}{dt} = L\frac{di}{dt} + (r+R)i$$

$(r+R)/L \ll \omega$ の場合右辺は $Li\left(\omega + \frac{r+R}{L}\right)$

より第 2 項を無視して，$\frac{d\phi}{dt} \cong L\frac{di}{dt}$

i は，コイル断面積 A , トーラス方向長さ ℓ より

$$i = \frac{\phi}{L} = \frac{\mu_0 NAI}{\ell} \Big/ \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} = \frac{I}{N}$$

より出力は $V = Ri = \frac{R}{N}I$

出力電圧は被測定電流と出力抵抗に比例，巻数に反比例。$(r+R)/L \ll \omega$ から測定下限周波数，上限無し→高速パルス電圧や高周波計測に適す。ただし，実際にはコイルの外周に巻くシールド板とコイル間の静電容量やコイル自身の浮遊の LC により高周波側にピークが生じ，これが測定可能周波数の上限となる。