

過充放電時における電解コンデンサの温度特性評価

西川 滉大* 日下 佳祐 伊東 淳一（長岡技術科学大学）
小林 頌承（日本ケミコン株式会社）

Evaluation of Temperature Characteristics of Electrolytic Capacitors with Over-charging and Over-discharging

Kodai Nishikawa*, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)
Yosuke Kobayashi (Nippon Chemi-Con Corporation)

This paper proposes the concept of short-time operation when the ripple current exceeds the allowable value. Operable time is determined by the temperature of the electrolytic capacitor. The temperature characteristics of electrolytic capacitors are measured by applying a pulsating voltage. The calculated value and the measured value by experiment are compared for transient temperature changes and operable time. The possibility of estimation to the operable time is confirmed by comparison result of transient temperature changes. The calculation method of the expected life during short-time operation is shown.

キーワード：電解コンデンサ，リップル電流，過充電，過放電，温度特性

(Keywords, electrolytic capacitor, ripple current, over-charging, over-discharging, temperature characteristics)

1. はじめに

近年，電力変換器の高パワー密度化のため受動素子の最適化手法が重要になっており⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾，特に単相変換器の場合，平滑キャパシタが注目されている⁽⁵⁾。単相電力変換器としてPWM整流器とPWMインバータによるBTB(Back to back)システムの場合，平滑キャパシタとして電解コンデンサが使用され，キャパシタ選定において定格リップル電流が制約条件となる場合がある。

本論文では，電解コンデンサの温度上昇に着目し，電解コンデンサに定格リップル電流値以上の電流を流す許容時間について検討する。また，発熱試験により求めた熱時定数を使った算定値との比較を行い，電流値に応じた動作可能時間推定の妥当性を検証する。

2. 電解コンデンサ短時間電流定格

<2.1>電解コンデンサ電流定格 図1に，電解コンデンサに流すリップル電流値と素子内部温度変化についての概念図を示す。電解コンデンサにリップル電流を流すと，端子台やリード線の抵抗成分によるジュール損失や誘電体の誘電損失によって発熱する。この時，素子内部温度上昇が過大となると電解液のガス化による圧力弁の作動や液漏れ，ドライアップといった故障が誘発される。そのため，電解コンデンサに流すことができるリップル電流値には温度上昇によ

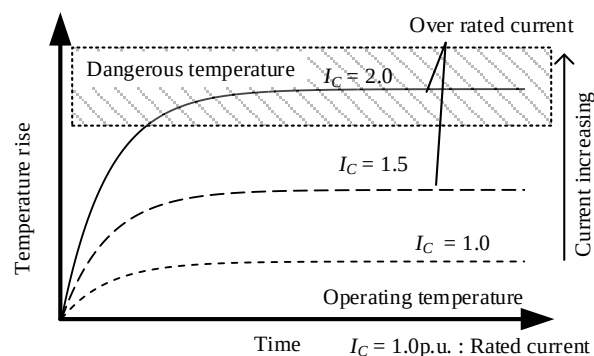


Fig. 1. Conceptual diagram of rated current

る制限がある。定格リップル電流値はカテゴリ上限温度での内部抵抗(ESR)と許容温度上昇値，熱抵抗値に依存する。また，カテゴリ上限温度よりも低い温度環境で使用した場合は，寿命の観点から問題ない値にまで許容温度上昇を引き上げて使用できるが，低温環境では熱暴走領域があるため，温度環境によって引き上げられる最高温度は異なる。

<2.2>電解コンデンサ短時間電流定格 図2に，短時間動作時に着目した素子内部温度変化の概念図を示す。電解コンデンサの定格リップル電流値は定常状態における許容温度上昇値をもとに決定されている。一方，定格値以上のリップル電流を流しても短時間であれば温度上昇は許容値以内に

収まる。よって、短時間動作時には従来の連続の電流定格値よりも大きな電流定格を許容できると考えられる

短時間電流定格は電解コンデンサの過渡的な温度変化特性によって次のように決定される。ESR、熱抵抗、熱時定数を温度変化時において一定と仮定した場合、定格の X 倍のリプル電流 $X \cdot I_{\text{rated}}$ 通流時における発熱量は ESR と $X \cdot I_{\text{rated}}$ の 2 乗との積となり、最終温度における温度上昇は発熱量と熱抵抗の積となるため、最終温度は定格リプル電流通流時の最終温度上昇 ΔT_{rated} を用いて以下の式で表される。

$$\text{ESR} \cdot (X \cdot I_{\text{rated}})^2 \cdot R_{\text{th}} = X^2 \Delta T_{\text{rated}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1)式より、定格の X 倍のリプル電流を流した場合、最終温度上昇は定格の X^2 倍となることがわかる。この関係より、定格の X 倍リプル電流通流時における Δt 秒後の過渡温度上昇量 ΔT_{rise} は、熱時定数 τ と ΔT_{rated} を用いて以下の式で表される。

$$X^2 \Delta T_{\text{rated}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right\} = \Delta T_{\text{rise}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2)式より、変形して許容リプル電流比(短時間許容リプル電流の定格電流に対する比) X を求めると以下のようになる。

$$X = \sqrt{\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right\}^{-1} \frac{\Delta T_{\text{rise}}}{\Delta T_{\text{rated}}}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

3. 電解コンデンサ温度測定実験

<3.1>実験構成 図 3 に、実験による温度特性取得構成を示す。電解コンデンサの温度測定点は素子中心、素子側面、マイナスタブの 3 箇所とし、T 型熱電対により測定した。電源には可変電圧源として直流再生電源を使用し、電解コンデンサとの直列接続とした。

表 1 に、実験条件を示す。インバータ直流部における電圧脈動分として 100 Hz の交流成分とバイアス用の直流成分による電圧を印加し、単相電力変換器直流部における電圧脈動を再現した。電解コンデンサに印加する電圧と電流の関係は以下で表される。

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式より、実験条件である $v(t) = V_{\text{dc}} + V_{\text{sine}} \sin \omega t$ を代入すると以下のようになる。

$$i(t) = \omega C V_{\text{sine}} \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式より、電圧脈動時に電解コンデンサに通流する電流リプルを再現した。また、周囲温度は電力変換器筐体内で利用されることを想定し恒温槽を用いて 60 °C 一定とした。温度上昇値上限は熱暴走領域を考慮し、60 °C を基準に $\Delta t = 29$ °C とし、これを超えない範囲を動作可能領域と設定した。

<3.2>測定結果 図 4 に $V_{\text{sine}} = 16.4$ V 時の電解コンデンサ

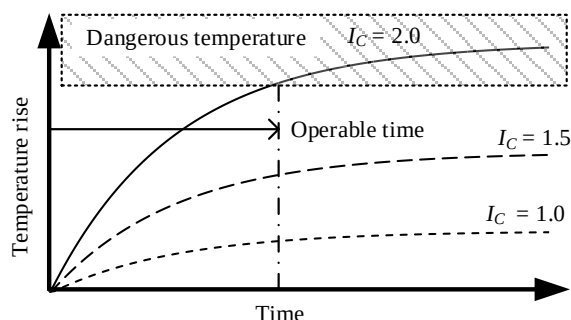
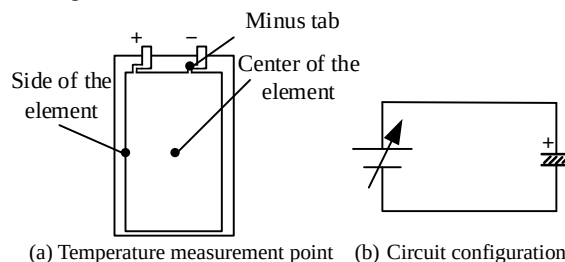


Fig. 2. Conceptual diagram of short-time rated current



(a) Temperature measurement point (b) Circuit configuration
Fig. 3. Experimental configuration to measure capacitor temperature

Table 1. Experimental parameter

DC bias voltage	V_{dc}	30 V
Sine voltage	V_{sine}	8.1, 16.4, 20.3 V
Sine frequency	f_{sine}	100 Hz
Applied current	I_{sine}	42.7, 85.4, 106.8 A _{rms}
Capacitor: ECSH401LGN123MFH0N NIPPON CHEMI-CON	C	12 mF
Capacitor rated voltage	V_{rated}	400 V
Maximum category temperature	T_{rated}	85 °C
Rated ripple current (85 °C/ΔT:10 °C)	I_{rated}	42.7 Arms
Equivalent Series Resistance(ESR) (60 °C / 100 Hz)	ESR	0.0033 ~ 0.0029

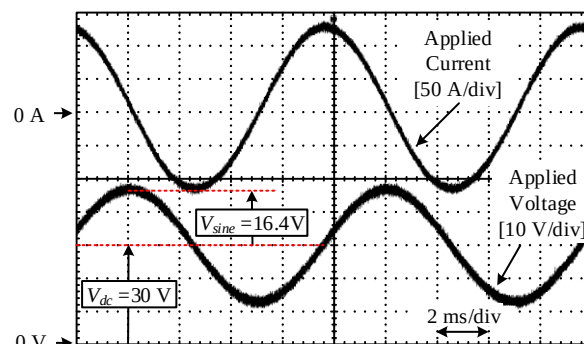


Fig. 4. Capacitor voltage and current waveform.

に印加されている電圧電流波形を示す。結果より、電圧は条件通りの直流 30 V に加えて 100 Hz 16.4 V の正弦波が重畳されており、電流は定格より 2 倍の 85.4 A_{rms} となっている。

図 5 に定格より 2 倍の電流出力時の温度変化特性を示す。電流通流直後に着目すると、マイナスタブの温度が電解コンデンサ素子と比較して急速に増加し、他の部分より高温となっていることがわかる。また、マイナスタブの許容温度は電解液を使用した素子部分より十分高いものの、実使用時には電解コンデンサ寿命の観点より最高温度は 110 °C

前後として使用するのが望ましい。なお、タブの温度はバスバー構造の工夫等によって冷却性能を向上させ大きく低減することが可能である。

電解コンデンサ素子の温度上昇に着目すると、素子中央部の温度は素子側面部に比べて高温であることが確認できる。これはコンデンサ素子の発熱は素子全体に対して一様であるが、素子中心部は素子側面部よりも熱を外部に放熱しづらいことが原因である。そのため、短時間電流定格を検討する上では素子中で最も高温となる素子中央部の温度上昇特性を考慮すれば良い。

図 6 に通流電流を変化させた時の温度変化特性の測定結果と算定結果を示す。算定結果における熱時定数は 68 A_{rms}(I_C = 1.6p.u.)/40 °C 120 Hz 条件における発熱試験結果より、初期値から最終温度値までの 63.2%となる時間から求め 4150 sec とした。また、熱抵抗は発熱試験により重畳リプル電流の 2 乗と ESR の積に対する最終温度 ΔT_{reted} との関係は 3 点程度プロットした近似直線の傾きから求めた。熱容量は熱時定数と熱抵抗の関係から求め、発熱はリプル電流値の 2 乗と ESR の積とした。温度変化特性に着目すると、定格の 2.5 倍の電流通流時における動作可能時間は、測定結果では 2508 秒、算定結果では 2587 秒と測定結果より 3%程度長くなっている。誤差要因として、電解コンデンサに使用されている陽極酸化皮膜の損失が温度依存性を有しており、高温ほど損失が大きくなることが考えられる。他の要因として、熱抵抗の温度特性や実験条件の誤差によるものが挙げられる。以上、定格電流での発熱試験から短時間電流定格を推定することは可能であることがわかる。

<3.3>短時間電流定格計算 温度が飽和するまで発熱試験を行わなくても、ある程度の時間の発熱試験結果を用いて最終温度、熱抵抗、熱時定数を同定することで短時間電流定格を求めることができる。ESR、熱抵抗 R_{th} 、熱時定数 τ を温度変化時において一定と仮定した場合、 Δt 秒後における温度 $T_{\Delta t}$ は、最終温度 T_{max} と周囲温度 T_{ambient} を用いて次のように表せる。

$$T_{\Delta t} = (T_{\text{max}} - T_{\text{ambient}}) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} + T_{\text{ambient}} \quad \text{.....(6)}$$

(6)式を変形すると、次のように表せる

$$T_{\text{max}} - T_{\Delta t} = (T_{\text{max}} - T_{\text{ambient}}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{.....(7)}$$

(7)式の両辺の自然対数を求めると以下のようにになる。

$$\ln(T_{\text{max}} - T_{\Delta t}) = \ln(T_{\text{max}} - T_{\text{ambient}}) - \frac{t}{\tau} \quad \text{.....(8)}$$

実験による等時間間隔の温度測定点 $t = t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ のうち、隣り合う 2 測定点 t_1, t_2 を(8)式に代入して差分を求めると次のように表せる。

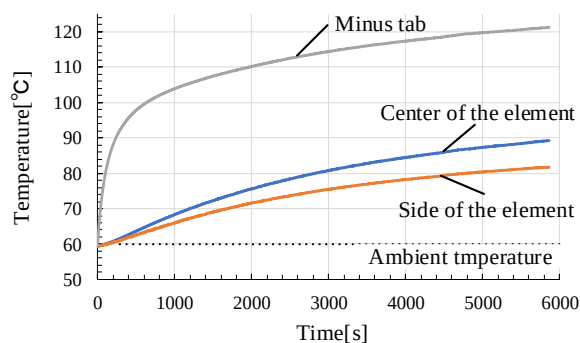


Fig. 5. Capacitor temperature rise characteristics

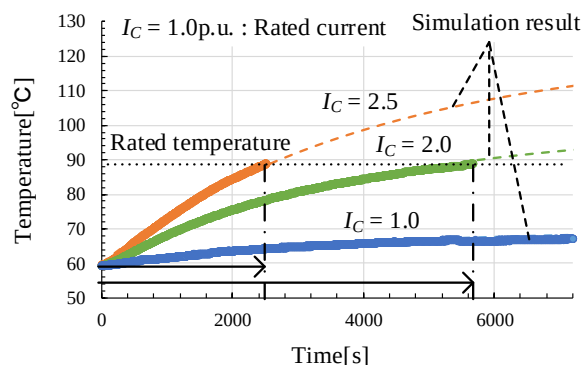


Fig. 6. Temperature comparison between calculated value and measured value

$$\ln(T_{\text{max}} - T_{\Delta t1}) - \ln(T_{\text{max}} - T_{\Delta t2}) = \frac{1}{\tau}(t_2 - t_1) \quad \text{.....(9)}$$

(9)式の両辺の指数関数を求めて(10)式を得る。

$$\frac{T_{\text{max}} - T_{\Delta t1}}{T_{\text{max}} - T_{\Delta t2}} = \exp\left(\frac{t_2 - t_1}{\tau}\right) \quad \text{.....(10)}$$

同様に、 t_2, t_3 についても(8)式の差分の指数関数を求めると(11)式となる

$$\frac{T_{\text{max}} - T_{\Delta t2}}{T_{\text{max}} - T_{\Delta t3}} = \exp\left(\frac{t_3 - t_2}{\tau}\right) \quad \text{.....(11)}$$

ここで(10)式と(11)式の右辺は等価であるため、(10)式および(11)式より T_{max} は以下のように表せる。

$$T_{\text{max}} = \frac{T_{\Delta t1} T_{\Delta t3} - T_{\Delta t2}^2}{T_{\Delta t1} + T_{\Delta t3} - 2T_{\Delta t2}} \quad \text{.....(12)}$$

(12)式を複数の測定点に適応し、計算した T_{max} の平均を求めることで比較的短時間の温度試験結果より最終温度を求めるられる。

次に求めた最終温度 T_{max} を用いて熱抵抗と熱時定数を推定する。熱抵抗 R_{th} は、ESR とリプル電流 I_{ripple} をより(13)式で表される。

$$R_{th} = \frac{T_{\text{max}}}{ESR \cdot I_{\text{ripple}}^2} \quad \text{.....(13)}$$

一方、測定結果と熱時定数 τ の関係は、(8)式を変形し以下のよう表せる。

$$\frac{t}{\tau} = \ln \left(\frac{T_{\max} - T_{\text{ambient}}}{T_{\max} - T_{\Delta t}} \right) \dots\dots\dots (14)$$

(14)式より、熱時定数 τ は傾きの逆数となるため、測定結果を(14)式に代入し最小2乗法によって傾きを計算することで求めることができる。

実際に、電流リプル定格の2.5倍時における測定結果から、動作時間10分における短時間電流定格を計算する。表1よりESRを0.0031とし、(12)式、(13)式、(14)式を用いて最終温度、熱抵抗、熱時定数を求めるとそれぞれ、 $T_{\max} = 123.1^{\circ}\text{C}$ 、 $R_{\text{th}} = 1.79 \text{ K/W}$ 、 $\tau = 3383 \text{ sec}$ となる。求めた熱抵抗を(1)式に代入し、定格リプル電流時の最終温度を求めると、 $\Delta T_{\text{rated}} = 10.1^{\circ}\text{C}$ となる。使用温度環境での許容温度上昇値を 29°C とすると、 $\Delta t = 600 \text{ sec}$ (10分)時において $\Delta T_{\text{rise}} = 29^{\circ}\text{C}$ となる電流が短時間電流定格である。そこで、求めた値を(3)式に代入すると下記が得られる。

$$X = \sqrt{\left\{ 1 - \exp \left(- \frac{600}{3884} \right) \right\}^{-1} \frac{29}{10.1}} \approx 4.48 \dots\dots\dots (15)$$

よって、10分動作時には定格の約4.48倍の電流を短時間電流として流せると推測できる。

4. 短時間動作時における期待寿命

基板自立形、ネジ端子形の場合における実使用時の期待寿命 L_x は、カテゴリ上限温度における定格リプル電流通流時の規定寿命 L_r (hours)、製品のカテゴリ上限温度 T_o ($^{\circ}\text{C}$)、実使用時の周囲温度 T_x ($^{\circ}\text{C}$)、定格リプル電流通流時の自己温度上昇 ΔT_o ($^{\circ}\text{C}$)、通流電流による自己温度上昇 ΔT ($^{\circ}\text{C}$)、周囲温度加速の補正係数 K_t 、電圧軽減率 K_v 、リプル電流による自己温度上昇加速係数 A を用いて以下の式で表される。

$$L_x = L_r \cdot 2^{\frac{K_t(T_o - T_x)}{10}} \cdot 2^{\frac{\Delta T_o - \Delta T}{A}} \cdot K_v \dots\dots\dots (16)$$

短時間動作使用時における稼働時と非稼働時それぞれの期待寿命は(16)式を用いて推定できる⁽⁶⁾。(16)式より、稼働時の推定寿命 L_{x1} および非稼働時の推定寿命 L_{x2} を求め、動作時間より稼働時間の割合 R_1 、非稼働時間の割合 R_2 をそれぞれ算出すると、稼働時と非稼働時を合わせた複合期待寿命は以下の式で表される。

$$L_x = \frac{1}{\left(\frac{R_1}{L_{x1}} + \frac{R_2}{L_{x2}} \right)} \dots\dots\dots (17)$$

表2に、具体的な例として複合期待寿命を求める条件を示す。稼働時、非稼働時それぞれの条件を(16)式に代入すると、それぞれの期待寿命は L_{x1} : 26,677時間、 L_{x2} : 219,230時間となる。
この時、例えば稼働時間を一日あたり10分とすると、 R_1 :

Table 2. Condition of estimation to life time with short-time operation

Symbol	During operation	During non-operation
L_r	2000	2000
T_o	85	85
T_x	45	45
ΔT	16.2	0
ΔT_o	10	10
K_t	1.09	1.09
K_v	1	2.67
A	10	10

0.69%， R_2 : 99.31%となり、(17)式に代入して計算すると複合期待寿命は約23.8年となる。実際には、封止ゴムの寿命を考慮すると期待寿命は15～20年となる。

5. まとめ

本論文では、電解コンデンサの定格リプル電流よりも大きな値の電流が通流したときにおける短時間動作の可能性について、電解コンデンサの温度測定結果をもとに示した。また、算定結果により短時間電流定格を推定できることを確認した。電解コンデンサの温度特性について、温度が飽和しない時間の発熱試験結果より同定する手法について示し、同定した最終温度、熱抵抗、熱時定数より任意の短時間電流定格の推定を行った。短時間動作時における期待寿命については、稼働時、非稼働時それぞれの期待寿命から複合期待寿命として求める手法を示した。最終的には、周囲温度条件の変化や負荷条件の変化などを鑑みてマージンを取り、許容電流と許容温度を決定する。

今後は、繰り返し短時間動作時における電解コンデンサ寿命についての調査を行う。

文 献

- (1) 渡辺 大貴, 小岩 一広, 伊東 淳一, 大沼 喜也, 宮脇 慧:「昇圧形アクティブバッファを有する電解コンデンサレス太陽光発電用系統連系インバータの開発」, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 5, pp. 467-474 (2015)
- (2) 渡辺 大貴, 伊東 淳一:「大容量エネルギーバッファレス単相絶縁形系統連系インバータの実機検証」, 電気学会論文誌 D, Vol. 138, No. 1, pp. 67-68 (2018)
- (3) 大沼 喜也, 伊東 淳一:「アクティブバッファを用いた単相降圧型PFC整流器の開発」, 電気学会論文誌 D, Vol. 133, No. 2, pp. 188-195 (2013)
- (4) Runruo Chen, Yunting Liu and Fang Zheng Peng: “DC Capacitor-Less Inverter for Single-Phase Power Conversion With Minimum Voltage and Current Stress”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.30, No.10 pp.5499-5507 (2015)
- (5) J.W. Kolar, U. Drogenik, J. Biela, M. Heldwein, H. Ertl, T. Friedli, and S.Round: “PWM Converter Power Density Barriers”, IEEJ Journal on Industrial Application, Vol. 128, No. 4, pp. 468-480 (2008)
- (6) 日本ケミコン株式会社:「テクニカルノート アルミ電解コンデンサの上手な使い方」, 製品ガイド
<https://www.chemi-con.co.jp/catalog/aluminum.html>