

## 직류링크 커패시터의 용량 추정시 온도특성 보정

普里斯\*, 金景鉉\*\*, 李東椿†, 李教範\*\*\*, 金長睦\*\*\*\*

## Compensation of Temperature Characteristics for Capacitance Estimation of DC-link Capacitors

Xingsi Pu, Kyung-Hyun Kim, Dong-Choon Lee, Kyo-Beum Lee, and Jang-Mok Kim

## 요 약

본 논문에서는 3상 AC/DC/AC PWM 컨버터에서 직류커패시터 용량의 정확한 추정을 위하여 동작온도 변화에 따른 커패시턴스의 변화를 보정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 커패시터의 동작온도를 측정하고 이에 따라 변화하는 커패시터 용량을 상온에서의 값으로 보정한다. 온도 측정을 위해 써미스터를 사용하고 써미스터에 나타나는 전압의 변화로 온도를 감지하여 동작온도에서 추정된 커패시턴스 값을 상온에서의 값으로 환산한다. 동작온도를 고려한 커패시턴스 보정 기법은 실험을 통하여 그 타당성이 검증된다.

## ABSTRACT

This paper proposes a correction method of capacitance estimation considering the temperature effect for the DC-link capacitor banks in three-phase AC/DC/AC PWM converters. At first, operating temperature of the capacitors is detected and capacitance variation is corrected due to the temperature effect. Thermistors are used for sensing the temperature and voltage variation across the thermistor is exploited to identify the capacitance change. The validity of the proposed method has been verified by experimental results.

**Key Words** : Capacitance, Estimation, Temperature effect, Thermister

## 1. 서 론

3상 PWM 컨버터는 교류 가변속 구동, 통합 전력품질조절기(unified power quality conditioner, UPQC), 무정전 전원장치(UPSs), 풍력발전시스템 등에 널리 활용되고 있다. 전해 커패시터는 가격이 낮고 용량이 커

필터나 에너지 버퍼로서 AC/DC/AC PWM 컨버터의 직류링크 단에 흔히 사용된다. 일반적으로 전해커패시터 수명은 컨버터의 다른 부품에 비하여 매우 짧으므로 시스템 전체의 수명에 영향을 미치게 된다<sup>[1]</sup>. 따라서 시스템의 효율적인 유지 보수를 위하여 커패시터 교체시기를 판별할 필요가 있다. 전해 커패시터는 사용시간이 지남에 따라 내부 전해질의 휘발에 의해 용량이 감소한다. 실제 커패시터의 용량은 동작주파수와 동작온도에 민감하므로 용량 추정시 이를 고려하여야 한다.

대부분의 전력변환 시스템에서 커패시터는 시스템 내부에 설치되어 있어 계측기로 용량을 측정하기 위해서는 시스템으로부터 분리해야 하므로 측정이 어렵다.

†교신저자 : 정회원, 영남대 전기공학과 교수

E-mail : dclee@yu.ac.kr

\*학생회원, (주)에이디티 연구원

\*\*학생회원, 영남대 전기공학과 석사과정

\*\*\*정회원, 아주대 전자공학부 부교수

\*\*\*\*정회원, 부산대 전자전기공학부 부교수

접수일자 : 2010. 8. 3

1차 심사 : 2010. 8. 23

2차 심사 : 2010. 8. 30

심사완료 : 2010. 8. 31

그 동안 전해 커패시터의 파라미터 추정에 관한 몇몇 연구가 발표되었다<sup>[2]-[5]</sup>. 그러나 이 방법들은 동작온도에 따라 커패시터의 파라미터가 변화하는 특성을 고려하지 않았다.

[6]에서는 10kHz 이상의 동작주파수에서 커패시터의 전체 임피던스가 등가직렬저항(ESR)과 거의 같다는 사실을 이용하여 ESR을 찾아내는 기법이 제시되었다. 그러므로 이 기법은 저주파수 컨버터에 응용하기는 곤란하고, 또 컨버터의 스위칭주파수가 바뀔 경우 새로운 스위칭주파수에서 온도와 ESR의 관계를 다시 구해야 하는 문제가 있다. [7]-[8]의 방법들은 알고리즘이 복잡하고 또 시스템이 중단 없이 계속적으로 동작할 때 유효하다.

본 연구에서는 3상 AC/DC/AC PWM 컨버터 시스템에서 커패시터를 시스템에서 분리하지 않고 전류주입을 통하여 온라인으로 커패시터의 용량을 추정하는 기법에서 커패시터 표면온도 측정을 통하여 동작온도에 따른 커패시턴스의 변화를 보상하는 알고리즘을 제안한다. 이러한 온도 보상 기법을 실험적으로 구현하고 그 타당성을 검증한다.

## 2. 커패시터의 용량 추정법

그림 1은 3상 AC/DC/AC PWM 컨버터의 회로, 그리고 제어기 및 커패시터 용량추정 블록도를 보인다.

PWM 컨버터에서 직류링크 커패시터의 용량을 추정하는 방법은 [10]에 발표된 바 있다. 간단히 설명하면, 먼저 직류링크 전압에 교류성분을 주입하고 이 전압성분과 이에 대응되는 직류링크 전류를 검출하여 반복최소자승법(Recursive least squares, RLS)을 이용하여 커패시터의 용량을 계산한다. 커패시터 용량은 온도에 따라 변하는데 [10]에서는 이런 점이 고려되지 않았으므로 본 연구에서는 온도를 고려하여 커패시턴스 값을 보정하는 기법을 제안한다.

## 3. 커패시터의 온도 특성 보정

### 3.1 커패시터의 온도 특성

일반적으로 커패시터의 용량은 주파수 및 동작온도에 따라 변화한다. 그림 2는 본 연구에 사용한 커패시터의 데이터 시트로부터 커패시터의 온도 및 주파수 특성을 나타낸다<sup>[9]</sup>. 커패시터의 용량추정을 위하여 직류전압에 주입한 30[Hz]<sup>[10]</sup> 주파수에서 동작온도에 따른 커패시터 용량 값의 관계를 나타내면 그림 3과 같

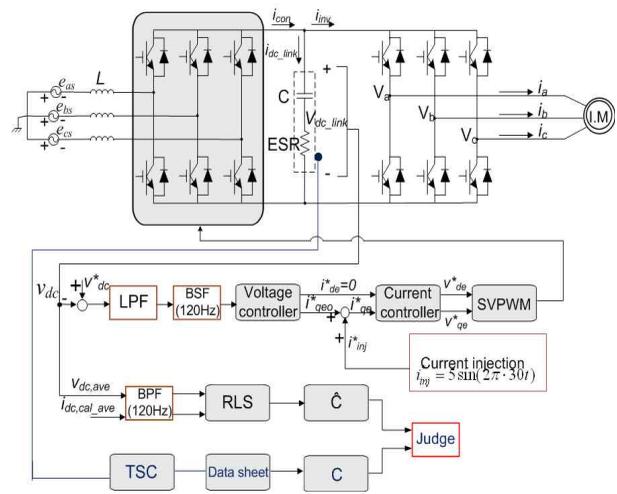


그림 1 3상 AC/DC/AC PWM 시스템의 커패시터 용량 추정과 온도보정 제어 블록도

Fig. 1 Control block diagram of estimating capacitance and temperature sensing for three-phase AC/DC/AC PWM converters

게 된다. 여기서 커패시터의 동작온도 범위는 -40도~+85도 이다<sup>[9]</sup>. 그림 3에 보인 것과 같이 동작온도가 증가하면 커패시터의 커패시턴스는 증가하고 동작온도가 감소하면 커패시턴스는 감소한다. 또 동작온도가 매우 낮을 경우 전해질의 활성도가 낮아져 커패시터 용량이 급격히 감소한다.

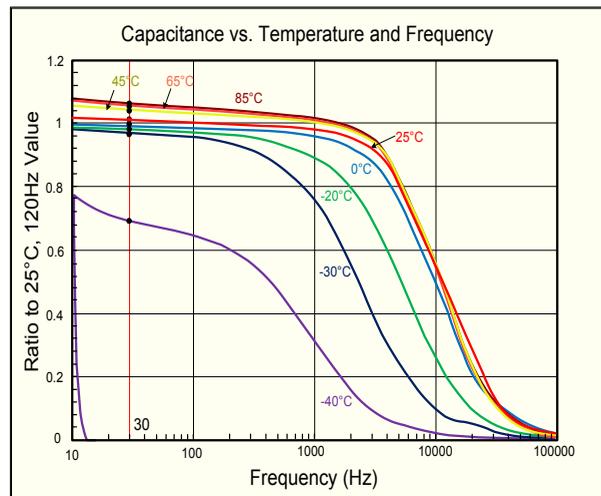


그림 2 주파수 및 온도 변화에 따른 커패시터의 용량  
Fig. 2 Effect of frequency and temperature on capacitance

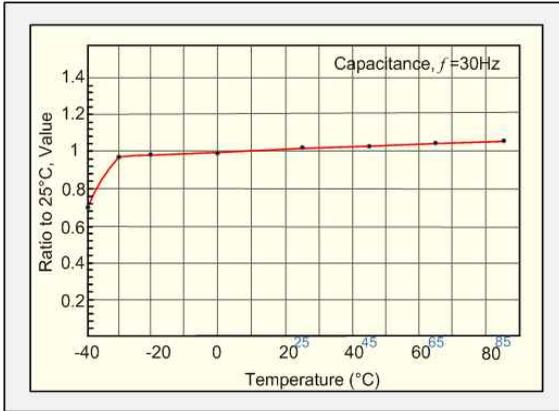


그림 3 30[Hz]에서 온도 변화에 따른 커패시터의 용량  
Fig. 3 Effect of temperature on capacitance at 30 Hz

### 3.2 온도 측정

일반적으로 커패시터의 동작온도  $T_{core}$ 는 커패시터 내부 전해질의 온도를 뜻한다. 그러나 실제 내부온도를 정확하게 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 커패시터 표면 온도  $T_{case}$ 를 이용하는 연구<sup>[6]</sup>와 열전달 방정식에 의하여 커패시터 내부 온도를 계산하는 방법<sup>[7]</sup>이 사용되어 왔다. [7]의 방법에서 내부온도를 정확히 알아내려면 열전달식을 계산하여야 한다. 이를 위해서는 커패시터의 성질과 구조에 관련된 파라미터가 필요하다. 그러나 이 파라미터들은 구하기 어려우므로 본 연구에서는 [6]의 방법을 따라 PWM 컨버터 시스템이 장시간 동안 동작하여 커패시터의 동작온도와 표면 온도가 같다고 가정하여 커패시터의 내부온도를 다음과 같이 표시한다.

$$T_{core} \cong T_{case} \quad (1)$$

온도센서를 이용하여 커패시터의 동작온도 측정회로를 그림 4와 같이 구성한다. 온도 측정회로에서 온도센서와 직렬로 연결된 저항은 높은 온도에서 저항이 낮아지는 써미스터의<sup>[11]</sup> 특성을 고려하여 전류를 제한하는 역할을 하고 직류전원 양단에 연결된 커패시터는 측정회로에 공급되는 전원을 안정하게 유지시키는 역할을 한다.

커패시터 표면온도  $T_{case}$ 를 측정하기 위해 온도 센서를 커패시터 표면에 부착한 후 5[V]의 직류전원을 공급하면 전압분배법칙에 따라 온도센서 양단에 전압이 걸리게 되고 이 전압값을 제어 보드를 통하여 읽는다.

측정된 전압값을 이용하여 온도를 알기 위해서는 전

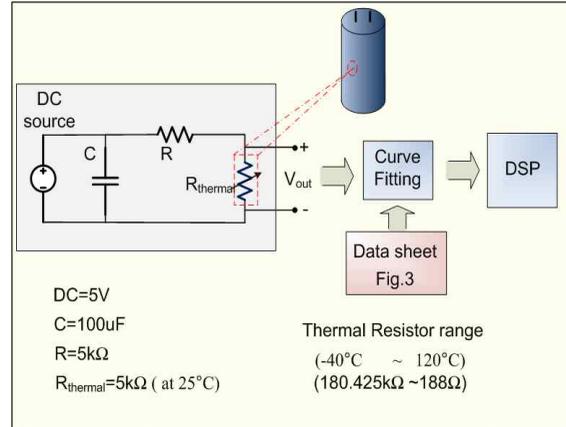


그림 4 온도 검출 회로  
Fig. 4 Temperature sensing circuit

압과 온도사이의 관계를 알아야 한다. 이 관계는 온도센서의 데이터시트를 이용하여 다음과 같이 구한다. 먼저 그림 5에 나타낸 것과 같이 커패시터의 동작온도에 상응하는 온도센서의 저항값들을 데이터시트로부터 추출한다. 다음, 추출된 값들을 이용하여 각 저항값에서 온도센서 양단의 전압을 계산한다. 그 결과는 그림 6과 같다. 이로써 온도센서 양단의 출력 전압값은 커패시터의 온도 정보를 포함하게 되고 그 관계가 그림 7로 나타내어진다.

### 3.3 온도 특성 보정

커패시터는 용량이 초기치로부터 25%<sup>[12]</sup>이상 감소하면 수명이 다한 것으로 본다. 커패시터는 온도에 따라 변하므로 온도의 영향을 고려하여 이를 판단하여야 한다.

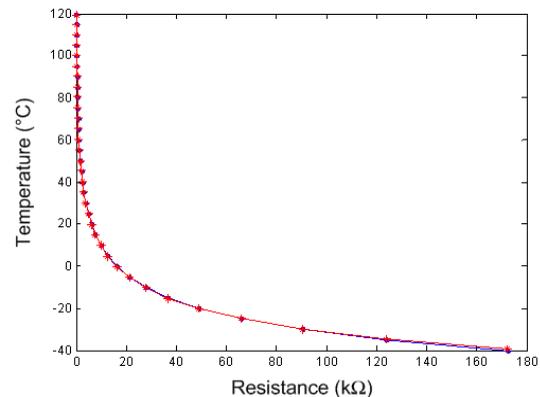


그림 5 온도 변화에 따른 써미스터 저항값  
Fig. 5 Effect of temperature on resistance of thermister

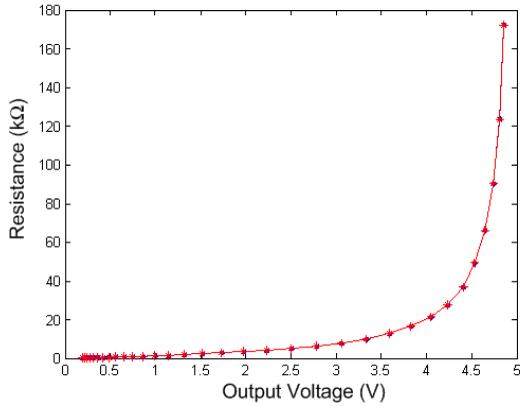


그림 6 Thermister 저항 값의 변화에 따른 출력전압  
Fig. 6 Effect of thermister resistance on output voltage

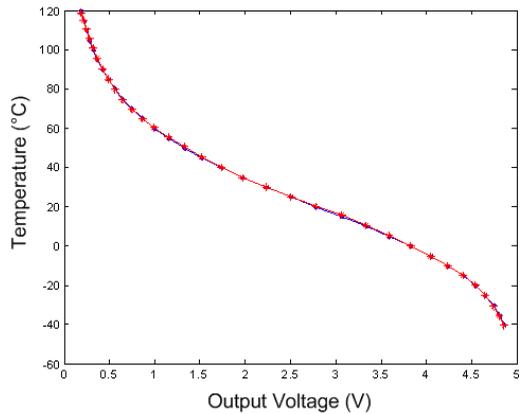


그림 7 온도 변화에 따른 출력전압  
Fig. 7 Effect of temperature on output voltage

온도와 커패시턴스의 관계를 나타내는 그림 3과 온도와 써미스터 측정회로의 출력전압의 관계를 나타내는 그림 7로부터 써미스터 출력전압과 커패시턴스의 관계를 나타내는 그림 8을 얻을 수 있다. 그림 8에서의 7개의 데이터를 이용하여 그 관계를 Matlab 곡선 맞춤(curve-fitting) 도구를 이용하여 수식화 하면 식(2)를 얻을 수 있다.

$$Q(v) = a_1 v^6 + a_2 v^5 + a_3 v^4 + a_4 v^3 + a_5 v^2 + a_6 v + a_7 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.0001556, & a_2 &= -0.002552 \\ a_3 &= 0.01626, & a_4 &= -0.05205 \\ a_5 &= 0.09218, & a_6 &= -0.1098, & a_7 &= 1.088 \end{aligned}$$

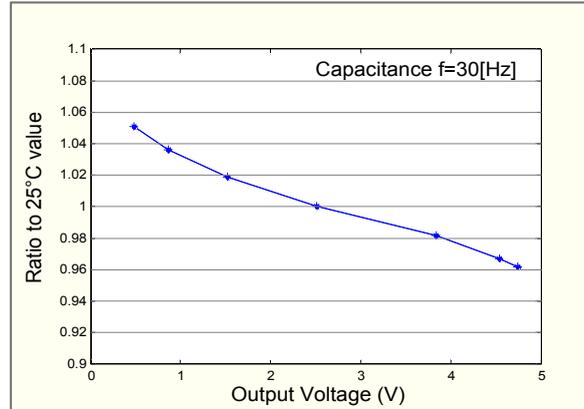


그림 8 써미스터 출력전압에 따른 커패시터 용량 변화  
Fig. 8 Capacitance variation with regard to sensed voltage

여기서  $v$ 는 온도측정부의 출력전압이고  $Q(v)$ 는 식(3)처럼 동작온도  $T [^{\circ}C]$ 에서의 커패시턴스 추정치  $\hat{C}(T)$ 와 이를 상온  $25[^{\circ}C]$ 에서의 값으로 환산한 커패시턴스  $\hat{C}(25^{\circ})$ 의 비를 나타낸다.

$$Q(v) = \frac{\hat{C}(T)}{\hat{C}(25^{\circ})} \quad (3)$$

식(3)으로부터  $25[^{\circ}C]$ 에서의 값으로 환산한 커패시턴스  $\hat{C}(25^{\circ})$ 는 식(4)로 주어진다.

$$\hat{C}(25^{\circ}) = \frac{\hat{C}(T)}{Q(v)} \quad (4)$$

이  $\hat{C}(25^{\circ})$ 의 값과 당초 커패시터의 사용 초기치의 값을 비교하여 열화의 정도를 판별할 수 있다.

#### 4. 실험 결과

제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 시스템 파라미터를 표 1에 보인다.

그림 9는 직류링크 전압주입시 전압제어기의 성능을 보인다. 직류링크 기준전압은 340[V]이며 주입된 교류 전압이 그 지령치를 잘 추종함을 보인다.

그림 10은 직류링크 전압의 리플을 발생하는 컨버터 입력측 q축 전류를 나타내며 실제 값이 지령 값을 잘 추종함을 보인다.

그림 11은 직류링크 전류 파형이다. (a)는 측정된 직

류링크 전류 순시값 및 계산된 전류 평균값을 나타낸다. (b)는 (a)의 확대 파형을 보인다.

그림 12는 커패시터 용량의 급격한 변화에 따른 추정 결과를 보여주고 있다. 초기에 두 커패시터  $C_1=2,078[\mu F]$ 와  $C_2=2,089[\mu F]$ 를 병렬 연결하여 전체 커패시터 용량을 추정하고 일정 시간 후  $C_1$ 을 직류링크에서 분리시켜 커패시터 용량에 급격한 변화를 준 경우로 추정 속도가 매우 빠름을 알 수 있다.

그림 13은 온도센서에 직접 온도 변화를 인가한 경우 이에 대해 출력전압이 변하게 되고, 이 출력전압 변화에 대해 커패시터의 용량이 변하는 관계를 나타낸다. 이는 그림 8에 나타난 온도센서부의 출력전압 변화에 따른 커패시턴스 변화와 일치한다.

그림 14는 PWM 컨버터 시스템에 커패시터 표 2에 보인  $C_2$ 만이 연결되어 동작될 때 커패시터 용량을 추정하면서 온도의 영향을 보정한 결과를 보인다.

표 1 시스템 파라미터  
Table 1 System parameters

파라미터	파라미터 값
컨버터 용량	3 [kW]
입력전압	220 [V <sub>rms</sub> ]
승압용 인덕터의 인덕턴스	2.75[mH]
승압용 인덕터의 저항값	0.06 [ $\Omega$ ]
스위칭 주파수	5 [kHz]
직류링크 전압	340 [V]
샘플링 시간	100 $\mu$ s

표 2 커패시터 값  
Table 2 Capacitor parameters

파라미터	$C_1[\mu F]$	$C_2[\mu F]$	$C_1+C_2[\mu F]$
공칭 값 (25°C at 120[Hz])	2,200	2,200	4,400
공칭 값 (25°C at 30[Hz])	2,100	2,100	4,200
LCR 측정값(25°C at 30[Hz])	2,078	2,089	4,167
추정값 (25°C at 30[Hz]) (교류전류 주입시)	-	2,097	4,199
오차	-	0.38%	0.78%

동작온도 25.3°C에서 온도센서부의 출력전압은 2.49[V]이고, 이 때 커패시턴스 추정값은 2097.6[ $\mu F$ ]이다. 이 값을 식(4)를 이용하여 상온으로 보정하면 커패시턴스 값은 2,097[ $\mu F$ ]이 된다. 표 2에서 보인 바와 같

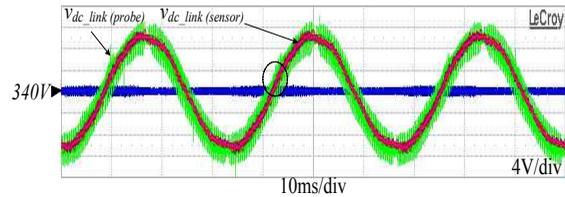


그림 9 전압 제어 성능  
Fig. 9 Performance of voltage control

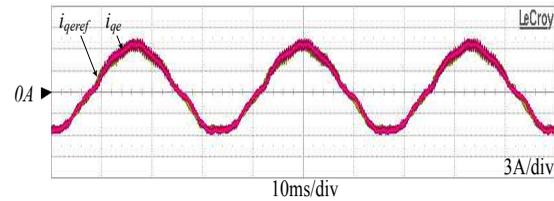


그림 10 전류 제어 성능  
Fig. 10 Performance of current control

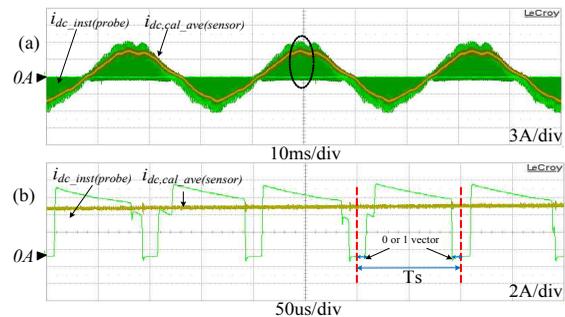


그림 11 (a) 직류링크의 전류 순시값과 전류 평균값  
(b) (a)의 선택된 구역 확대 파형  
Fig. 11 (a) Instantaneous DC-link current and its average value  
(b) Zoom in on (a)

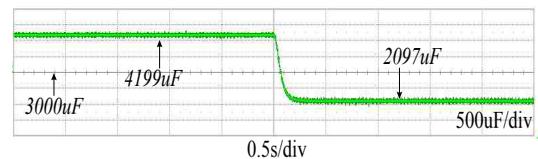


그림 12 급작스런 용량 변화 시 커패시터 용량 추정  
Fig. 12 Capacitance estimation at an abrupt variation of C

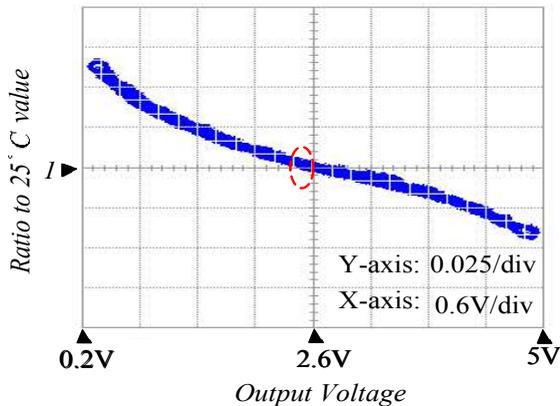


그림 13 온도센서의 출력전압과 커패시턴스의 관계  
 Fig. 13 Capacitance variation with regard to sensed voltage (experimental)

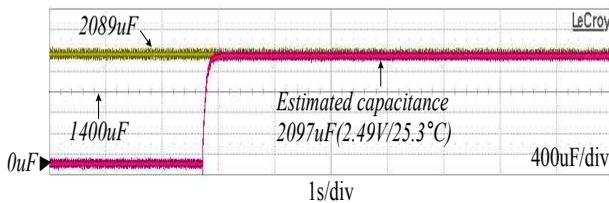


그림 14 온도를 고려한 커패시터 용량 추정 성능  
 Fig. 14 Capacitance estimation performance considering temperature effect

이 상온에서  $C_2$ 의 실측 커패시턴스 값은 2,089[ $\mu\text{F}$ ]인데 새 커패시터를 사용하였으므로 추정치는 실측치와 거의 같고 추정오차는 0.38%이다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 AC/DC/AC PWM 컨버터 시스템에서 직류링크 전해커패시터의 용량 추정시 동작온도가 커패시터의 용량에 미치는 효과를 고찰하고 그 효과를 보상하는 기법을 제안하였다. 커패시터의 온도측정회로를 설계하여 온도를 직접 측정함으로써 온도의 변화에 따라 야기되는 커패시턴스의 변화를 보정할 수 있다. 이러한 커패시터의 온도 특성 보정을 통해 커패시터의 열화 정도를 보다 정확히 진단할 수 있다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (20091020300380-11-2-100) 주관으로 수행된 과제임

## 참 고 문 헌

- [1] A. Lahyani, P. Venet, G. Grellet, and P. J. Vivierge, "Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switch mode power supply", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 13, No. 6, pp. 1199-1207, 1998, November.
- [2] E. C. Aeloíza, J. H. Kim, P. Ruminot, and P. Enjeti, "A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterrupted power supplies", in Proc. IEEE Power Electronics Spec. Conf., pp. 2867-2872, 2005, June.
- [3] A. G. Abo-Khalil and D.-C. Lee, "DC-link capacitance estimation in AC/DC/AC PWM converters using voltage injection", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 44, No. 5, pp. 1631-1637, 2008, September/October.
- [4] K.-W. Lee, Myungchul Kim, Jangho Yoon, S.-B. Lee, and J.-Y. Yoo, "Condition monitoring of DC-link electrolytic capacitors in adjustable speed drives", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 44, No. 5, pp. 1606-1613, 2008, September/October.
- [5] K. Abdennadher, P. Venet, G. Rojat, J. M. Retif and C. Rosset, "A real time predictive maintenance system of aluminum electrolytic capacitors used in uninterrupted power supplies", in Proc IEEE Ind. Appli. Soc. Annual Meeting, pp. 1-6, 2008, October.
- [6] P. Venet, F. Perisse, M. H. El-husseini and G. Rojat, "Realization of a smart electrolytic capacitor circuit", *IEEE Industry Appli. Magazine*, Vol. 8, No. 1, pp. 16-20, 2002, January/February.
- [7] M. L. Gasperi, "Life prediction modeling of bus capacitors in AC variable frequency drives", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 41, No. 6, pp. 1430-1435, 2005, November/December.
- [8] A. Riz, D. Fodor, O. Klug, and Z. Karaffy, "Inner gas pressure measurement based life-span estimation of electrolytic capacitors", in Proc. IEEE Power Electronics and Motion Control Conf., pp. 2096-2101, 2008, September.
- [9] Cornell Dubilier, Application guide, aluminum electrolytic capacitors, [www.cde.com](http://www.cde.com).
- [10] D.-C. Lee, K.-J. Lee, J.-K. Seok, and J.-W. Choi, "Online capacitance estimation of DC-link electrolytic capacitors for three-phase AC/DC/AC PWM converters using recursive least squares method", *IEE Proc. Electric Power Applicat.*, Vol. 152, No. 6, pp. 1503-1508, 2005, November.
- [11] Samkyung Ceramics, NTC\_502F397F, Datasheet, <http://www.skceramic.com>
- [12] Samwha Electric Inc., "Large aluminum electrolytic capacitors", [http://samwha.co.kr/electric/templatedirs/guest/list\\_pdf2/HP.pdf](http://samwha.co.kr/electric/templatedirs/guest/list_pdf2/HP.pdf).

저 자 소 개



**보성사(普星斯)**

1986년 1월 11일생. 2008년 영남대 전기공학과 졸업. 2010년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)ADT 연구원.



**김경현(金景鉉)**

1984년 1월 2일생. 2009년 영남대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



**이동준(李東椿)**

1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1988년 대우중공업 중앙연구소 주임 연구원. 1998년 미국 텍사스 A&M Univ. 방문연구교수. 2004년 미국 Univ. of

Wisconsin 방문연구교수. 현재 영남대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사.



**이교범(李敎範)**

1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공박). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in

Denmark 연구부교수. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 부교수. 당 학회 JPE 편집위원.



**김장목(金長睦)**

1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2001년 3월~현재 부산대 전자전기공학부 부교수. 당 학회 편집이사.