

電鐵 SIV用 DC 高出力 필터 커패시터 國產化 開發

박 병 주

삼화콘덴서공업(株) 진상응용기술팀장

1. 背 景

최근 電鐵의 需要가 급증하고 있다. 관련업체 소식에 따르면 향후 4년간 약 1,200량 정도의 電動車가 增車될 예정인 것으로 전해지고 있다.

이러한 電鐵需要의 增加에 맞추어 관련부품에 대한 國產化率을 가속화시킴으로써 國內技術 蓄積을 도모하고 아울러 대의 貿易逆潮 現象을 극복하는 계기가 되었으면 하는 바램이다.

電動車의 電源은 크게 分類하여 Traction 모터제어에 필요한 主電源과 附屬設備 즉, 照明, 에어컨, 히터 등에 필요한 補助電源으로 나뉘어 진다.

High Power Filtering Cpacitor의 사용개소는 Traction 모터 구동용(Chopper/VVVF)의 Inverter前端, 補助電源의 SIV(Static Inverter)前端이 된다.

여기서는 우선 SIV용 Filter Capacitor가 성공적으로 開發되어 6년여 동안 정상운전되고 있고 그 需要가 점차 확대될 전망이어서 이 부분에 대한 실제적이고도 체계적인 設計技術과 信賴度 및 評價技術에 대해 언급하고자 한다.

이를 계기로 他 關聯部品도 國產化 차원을 넘어 보다 적극적인 자세로 部品生産의 先進化를 이룰 수 있도록 업계가 공동의 노력을 기울여야 할 것으로 생각된다.

2. 回路 解析

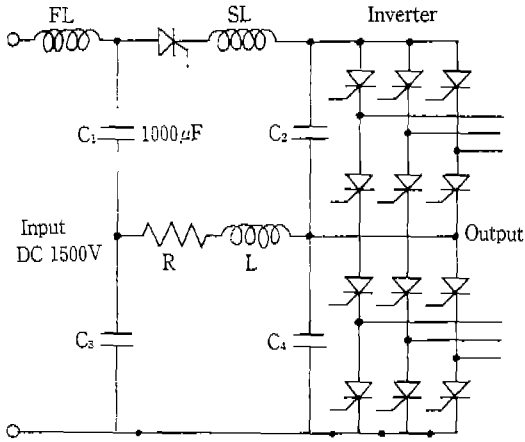
SIV Filter Capacitor가 사용되는 전형적인 주변회로의 간략도는 그림 1과 같다.

Filter Capacitor의 機能은 Inverter 入力端 直流電壓이 負荷變動으로부터 오는 電流變化에 따라 脈動이 커지게 되고 出力電壓 또한 高調波 損失이 增加하는 것이 보통인데 이러한 脈動을 補償하는 역할을 하게 된다.

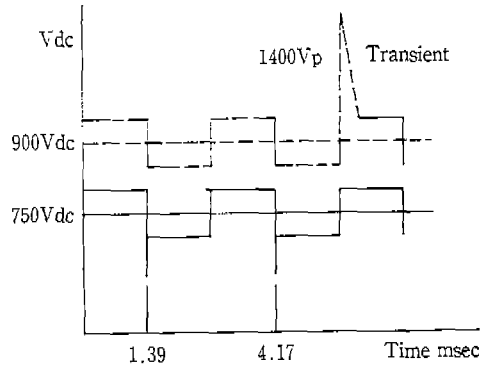
현재는 에어컨 등의 高出力化가 요구되어 Inverter의 容量과 Filter 容量이 比例的으로 大容量化 추세에 있다.

이와 같이 특수한 콘덴서를 設計하는데 있어 중요한 基礎資料가 되는 것으로 Capacitor의 端子電壓과 電流波形을 들 수 있다.

왜냐하면 이것들로부터 誘電損, 抵抗損 능을 예측하여 電極構造와 誘電體의 種類를 결정할



<그림 1> SIV Filter 주변회로



<그림 2> Capacitor 端子電壓

수 있기 때문이다.

다음의 端子電壓과 電流波形的 分析結果를 나타내었다.

가. Capacitor 端子電壓

이들 Filter Capacitor의 단자에 印加되는 電壓은 그림 2 와 같이 360Hz의 사각파형이다. 線路의 定格 電壓은 1500Vdc이며 全負荷時에는 偏側으로 750Vdc, 無負荷時는 偏側 900Vdc로 電動車的 負荷特性上 電壓變動率이 큰 편이다.

異常時에 순간적으로 발생하는 Transient Voltage의 크기는 1400Vp로 絶緣強度에 대한 誘電體 선정시 충분히 고려해야 한다.

다음 표 1에 Capacitor 端子電壓 특성을 나타낸다.

실제 Filter Capacitor에 흐르는 電流는 脈動分 實効電壓과 周波數(360Hz)에 의해서 결정된다.

예로써 Filter Capacitor 容量이 100µF인 경우 Capacitor 通過電流는 다음과 같이 얻을 수

있다.

$$I_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V_{rms} \dots\dots\dots (1)$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 360 \cdot 1000 \times 10^{-6} \times 8.84$$

$$= 20A$$

나. Capacitor 通過電流

Capacitor에 흐르는 電流는 單位時間當 電壓의 變化量 즉, dv/dt 에 의해서 결정된다. 여기서 發生되는 電流의 크기는 Capacitor를 이루는 構造上的 電氣的 Ohmic Resistance와 작용하여 i^2RT 의 Joule 熱을 發生하므로 設計時 중요한 Factor를 차지하게 된다.

理論的인 理想電流 波形은 그림 3과 같다. 電流值는 20A이고 負荷變動에 따라 過度電流가 약 5초간 55Ap 흐를 수 있는 것으로 가정한다 (SIV 定格出力 : 110 kW).

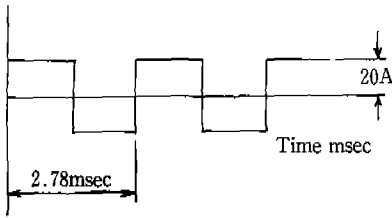
참고로 실측한 電流波형을 그림 4에 나타낸다.

실측된 電流波형은 약 23A 정도로 理論值보다 다소 높고 波형도 크게 歪曲된 現象이다.

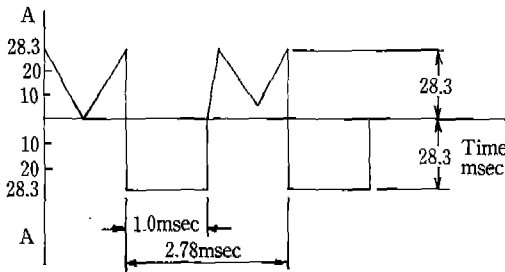
실제 Filter Capacitor의 溫度上昇과 직접 관

<표 1> Capacitor 端子電壓 特性表 例

全負荷 電壓	無負荷 電壓	電壓 變動率	脈動分 實効電壓	異常過渡 電壓
750Vdc	900Vdc	20%	8.84Vrms	1400Vp



<그림 3> Capacitor 通過電流 波形



<그림 4> Capacitor 通過電流 實測波形

련된 因者는 實効 電流值가 차지하는 比重이 지배적이므로 設計時 實効電流值에 근거하여 Capacitor의 等價 直列抵抗 ESR(Equivalent Series Resistance)을 결정, 豫想 Joule 熱을 산출하여야 한다.

實測된 電流值는 理論值보다는 다소 높게 나타났다(표 2 참조).

요구된 保證電流值는 예상되는 負荷變動에 충분히 견딜 수 있도록 여유를 둔 Filter Capacitor의 最大 許用電流로 생각할 수 있다. 물론 設計時 溫度上昇 등의 산출근거는 이 값을 적용하게 된다. 따라서 保證電流에 의한 표 1의 脈動分 實効電壓은 22.1Vrms가 된다.

3. Capacitor 設計 主要點

일반적으로 사용되는 電力用이나 機器用 Capacitor와는 달리 Snubber, Filter, Resonance, Commutation Capacitor와 같이 DC 회로에 應用되는 Capacitor를 設計하는데는 다

<표 2> Capacitor 通過電流 特性

理論值	實測值	要求된 保證電流
20Arms	23Arms	50Arms

음과 같은 事項이 필히 고려되어야 한다.

- 適用 個所의 用途에 맞는 誘電體 選定
- 誘電體의 絕緣強度
- 溫度上昇과 最高 許用電流
- 周波數 變化에 따른 損失特性과 溫度變化에 의한 容量變化率
- 體積과 經濟性

이를 좀더 자세히 살펴보기로 한다.

가. 誘電體 選定

Energy Storage用과 같이 高에너지 密度가 요구되는 곳이나 制限된 體積에서 大容量이 필요한 경우에는 誘電率이 높은 Paper類를 사용하는 것이 일반적이며 高周波下에서는 損失의 增加 때문에 適用하지 않는다.

표 3에 Capacitor用 誘電材料의 基本性質을 표시하였다. 보편적으로 誘電率이 높은 材料가 比例的으로 損失이 높아진다.

특히 Filter, Commutation, Snubber用과 같이 周波數가 높은 경우에는 低損失의 Film類를 선택하는 것이 溫度上昇 등의 安定化 측면에서 바람직하다.

Polypropylene Film의 경우는 Paper類에 비해 10배 정도의 低損失과 單位 體積當 5배 이상의 耐電壓性을 갖고 있어 經濟的이다. Paper의 Film類를 組合하여 사용하는 경우가 있는데 이 방법은 높은 部分放電 水準이 요구되는 곳에 Paper類의 含浸性을 이용하여 適用하게 된다.

나. 誘電體의 絕緣強度

電鐵이나 아크爐 등 특히 負荷變動이 심한 개소에는 豫想 電壓變動率과 異常過度電壓(Transient Voltage)을 충분히 고려하여 Capacitor의 定格電壓과 誘電體 두께를 결정한다. 앞의 2.

<표 3> 誘電體의 種類와 主要 特性

誘電體	誘電率(ε)	損失(%)	發火點(°C)	誘電強度(kV/mm)	密度
Paper 類	6~6.5				1.2~1.35
폴리프로필렌(PP : Polypropylene)	2.2	0.02		450	0.9
폴리에스터(PET : Polyester)	3.2	0.5		400	1.4
폴리카보네이트(Polycarbonate)	2.8	0.05		50	1.21
鑛物類(Mineral Oil)	2.3	0.1	165	20	0.86
피마자유(Castor Oil)	4.6	1.0	305	20	0.9
M-DBT	2.7	0.02	154	20	1
WAX	2.6	0.02	290	20	0.9
Silicon	2.8	0.02	360	20	0.9
植物類(Vegetable Oil)	3	0.1	370	20	0.91

가에서 언급된 바와 같이 SIV Filter Capacitor의 端子間 實測電壓은 無負荷時 最高 900Vdc, 異常過渡電壓 1400Vp로서 Capacitor의 定格電壓은 여유도 11%를 고려한 1000Vdc로 設定하는 것이 무난하다.

이미 開發된 1000Vdc, 2000μF 定格에 適用시킨 誘電材料는 Metallized Polypropylene Film으로 BDV의 최소치가 2mA·dc에서 3600Vdc로 나타났고 定格電壓의 2.7배를 1분간 印加했을 때에도 견딜 수 있는 충분한 絶緣耐力을 유지하고 있다.

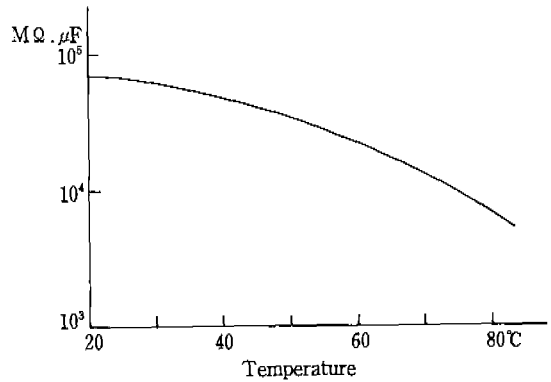
만약 이와 동등한 수준의 絶緣耐力을 갖는 Capacitor를 Paper類로 製作하려 한다면 體積面에서 크게 불리한 문제에 부딪히게 된다.

참고로 다음 그림 5에 Polypropylene Film의 溫度變化에 의한 絶緣抵抗變化推移를 나타낸다.

다. 溫度上昇과 最高 許用電流

콘덴서의 溫度上昇은 誘電體 固有 損失分과 電極 및 리드선 등의 구조상에서 오는 電氣의 直列抵抗分에서 발생하는 有效電力分の Joule 熱에 의한 것으로 溫度上昇의 크기는 Case 面을 통해 放出되고 남은 Capacitor 內部 殘存 熱量에 의해 결정된다.

다음에는 구체적으로 誘電體損과 直列抵抗分에 의한 溫度上昇分の 산출방법에 대해 설명한다.



<그림 5> 蒸着 Film(PP)의 溫度變化에 의한 抵抗變化 推移

誘電體損은 無效電力分을 구하여 損失率을 곱함으로써 얻을 수 있다(周波數 360Hz, 1000μF×2 容量, 實効電壓 22Vrms).

$$Q = (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot (V_{rms})^2 \times 1.35) \times 2 \dots\dots\dots (2)$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 360 \cdot 1000 \times 10^{-6} (22)^2 \times 2$$

$$= 2955.9 \text{ VAr}$$

常數 1.35는 여유율을 고려한 값이다.

$$\text{誘電體損 } W_f = Q \times \tan \delta \dots\dots\dots (3)$$

$$= 2956 \times 0.35 \times 10^{-2}$$

$$= 10.346 \text{ W}$$

따라서 Polypropylene Film의 경우 誘電損은 약 10.346W가 된다. 참고로 Paper인 경우 誘

電損은 약 60W 정도가 된다.

Ohmic Resistance에 의한 損失分은 다음과 같다.

電極의 구조에 따라 抵抗分이 달라지게 되는데 알루미늄 Foil을 電極으로 한 경우는 多素子를 並列로 연결하기 때문에 거의 '0'에 가깝다. 이 방법은 특히 Capacitor에 印加되는 $\frac{dv}{dt}$ 値가 큰 경우에 적합하다.

蒸着필름의 경우에는 金屬膜이 차지하는 抵抗分을 계산해야 하는데 適用式은 다음과 같다.

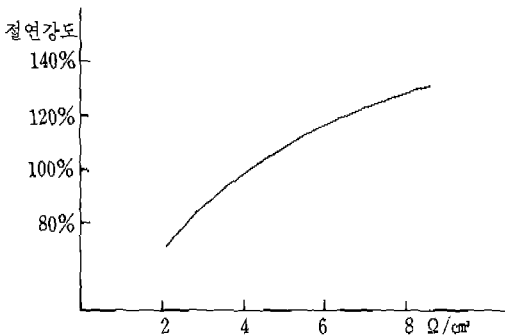
$$R_s = \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{\ell} (W + 2g + m) [\Omega] \dots\dots\dots (4)$$

- r : 單位 面積當 膜抵抗值 (Ω/cm^2)
- ℓ : 電極의 길이 (cm)
- W : 電極의 폭 (cm)
- g : Film의 엇갈림 (cm)
- m : Film의 Margin (cm)

式(4)에서 보는 바와 같이 R_s 값을 最小化하기 위해서는 電極幅을 줄이고 電極의 길이를 키우는 것과 單位面積當 膜抵抗值를 낮게 선택하는 것이 좋다.

일반 AC用 Film의 경우 膜抵抗值는 3.5~7 Ω/cm^2 , DC用的 경우는 2 Ω/cm^2 를 많이 사용한다.

그러나 그림 6에서 보듯이 膜抵抗과 耐電壓性과의 상관관계를 충분히 고려하여 膜抵抗值를 設定하는 것이 바람직하다.



<그림 6> 필름이 絶緣强度와 金屬膜抵抗

기 開發品의 例를 보면 電氣的 直列 抵抗分의 크기는 약 1.4m Ω 정도로 나타났다.

Ohmic Resistance에서 發生되는 Joule 熱量은

$$\begin{aligned} W_r &= i^2 \cdot R_s \dots\dots\dots (5) \\ &= 50^2 \times 1.4 \times 10^{-3} \\ &= 3.5 (\text{W}) \end{aligned}$$

위에서 언급한 式(3)과 式(5)의 결과로부터 豫想溫度上昇值(H.R로 표기함. Heat Run)를 계산하면 다음과 같다.

$$\text{H.R(deg)} = \frac{(W_f + W_r) \times 0.86}{\alpha \times S} \dots\dots\dots (6)$$

- W_f, W_r : 誘電體損, 直列抵抗損 (W)
- 0.86 : 常數 1W=0.86kcal/h
- α : 熱傳達 計數 6(W·kcal/h·deg·m²)
- S : 케이스 표면積 (m²)

$$\begin{aligned} &= \frac{(10.346 + 3.5) \times 0.86}{6 \times 0.87} \\ &= 2.28 (\text{deg}) \end{aligned}$$

따라서 豫상되는 溫度上昇值는 3deg 以下임을 알 수 있다. 참고로 Paper類를 誘電體로 한 경우에는 약 10deg 정도가 된다.

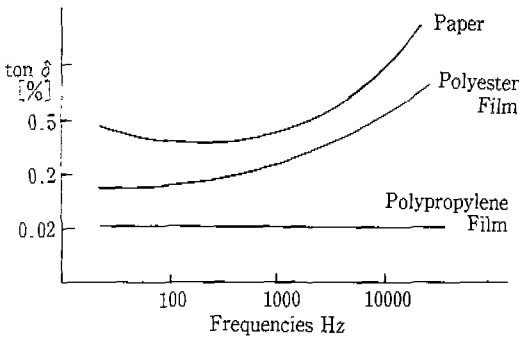
대개 電鐵의 경우 EIA RS-401의 最高許用溫度 基準에 따라 溫度範圍를 결정한다(-30~+80°C).

Capacitor에 通過되는 最大 許用電流를 구하기 위해서는 먼저 H.R 溫度上昇分을 얼마로 할 것인가 하는 문제와 직결된다.

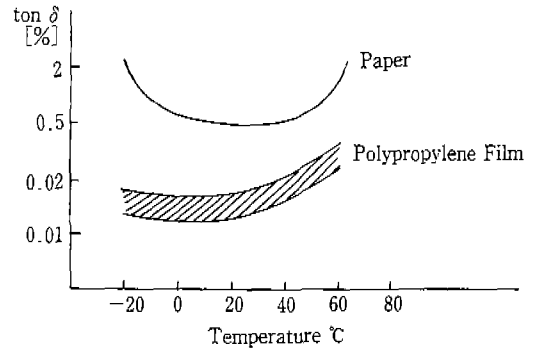
EIA RS-401(EIA: Electronic Industries Association, RS-401 Capacitors for Power Semiconductor Applications)의 規定에 의하면 H.R값은 15deg를 超過하지 말 것이라는 規定이 있다. 이 規定을 근거로 H.R值를 15deg로 한다면 앞의 式(6)에서 ($W_f + W_r$)誘電體損과 抵抗損의 合計를 구할 수 있다.

損失의 合計를 계산하면 91W가 되며 여기서 誘電體損이 360Hz에서 고정이라고 가정하면 W_f 의 許用最高損失은 80W이고 式(5)를 이용하여 풀면 最大許用電流 能力은 240A가 된다.

기타 부수적으로 검토되어야 할 사항은 周波



<그림 7> 周波數 變化에 의한 損失特性



<그림 8> 溫度變化에 의한 損失特性

數 變化에 의한 損失 特性과 溫度變化에 의한 容量變化率을 고려해야 한다. 다음 그림 7, 8에 이들 特性을 나타낸다. 특히 容量變化에 심한 誘電體 構成方式은 Capacitance 依存性이 큰 精密回路에는 적합치 않다.

4. Capacitor의 信賴度와 壽命

Capacitor의 信賴度를 評價하는 데는 먼저 信賴度의 基本的 概念에 대한 理解가 필요하다. 또한 客觀性을 갖춘 國際的 規格을 用途에 맞추어 適用하는 것이 중요한 문제다.

電鐵用 Capacitor에 관하여 별도로 規定된 것은 아직까지 나와 있지 않고 Capacitor 單品에 대해 適用할 수 있는 規定으로서 가장 근접하다고 할만한 것이 EIA RS-401(Capacitors for Power Semiconductor Applications)인 것 같다.

어떻든 Capacitor의 壽命에 관하여 論할 때에는 반드시 일정한 運轉期間(Operation Term) 후에 最小 殘存確率(Minimum Survival of Percent)은 얼마인가로 말해야 한다.

EIA RS-401의 規定은 Capacitor의 最大 許

- 겨울철 적정실내 난방온도는 18~20°C로써 겨울에 가장 쾌적한 온도입니다.
- 에너지소비가 급증하는 겨울철, 난방온도를 1°C만 낮춰도 7%의 에너지가 절약됩니다.
- 우리 모두 주변에 낭비되고 있는 에너지는 없는가 늘 살펴보고 절약을 습관화 합시다.

用電流, 電壓, Case 溫度下에서 40,000시간 運轉後에 最小한 95%의 殘存確率를 가질 것이라고 되어 있다.

복잡한 理論的 內容은 피하고 實例를 들어 설명하자면, Capacitor의 殘存確率은 곧 信賴度 R(Reliability)과 같은 뜻이다. 보다더 구체적인 말로 표현하자면 '어떤 規格의 製品은 運轉期間 ()Hrs에 殘存確率 ()%'이다'로 하는 것이 정확한 表現이 되겠다.

또하나 알아두어야 할 중요한 사항은 信賴度에 관한 式으로 다음과 같이 나타내는 것이 보편화되어 있다.

$$R = e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (7)$$

R : 信賴度
 λ : 故障率(單位 期間當 故障發生 個數를 의미한다)
 t : 運轉時間

다음에 例를 들어 이해를 돕고자 한다.

例) Power Capacitor의 定格 500kVAr, 1000대를 特定 電力設備에 供給한지 10년이 지난 현재 總 故障台數가 5대라면 20년 뒤의 이들 製品에 대한 信賴率은 얼마인가?

$$\lambda = \frac{5\text{대}}{1000\text{대} \times 10\text{년}} = \frac{1}{2000\text{년}}$$

$$t = 20\text{년}$$

$$R = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{1}{2000\text{년}} \times 20\text{년}} = e^{-\frac{1}{100}} = 99\%$$

즉 이들 製品에 대한 20년 후의 信賴度는 殘存確率 99%로 표현된다.

이상과 같이 信賴度를 판단하는데는 實製品의 故障發生頻度에 근거하여 추정하는 것이 이상적이다.

이미 開發된 Filtering Capacitor의 信賴度를

推定하여 다음에 결과를 나타내었다.

표 4 를 근거로 故障率을 산출하면

$$\lambda = \frac{2\text{대}}{1,673,600 \text{ H} \cdot \text{대}}$$

= 1.195 × 10⁻⁶/Hrs와 같고 EIA RS-401에서 정한 40,000Hrs 후의 信賴度를 구하면

$$R = e^{-\lambda t} \\ = e^{-1.195 \times 10^{-6} / \text{Hrs} \times 40,000 \text{Hrs}} \\ = 95.3(\%)$$

이상의 결과에서 볼 때 이미 開發된 Filtering Capacitor의 信賴度는 規定의 40,000 Hrs, 95% 殘存確率을 만족시키는 것으로 판단된다.

참고로 Capacitor의 壽命과 印加電壓, 周圍溫度와의 相關關係를 式으로 표현하면 다음 式(8)과 같이 나타낸다.

$$L_a = L_n \left(\frac{V_a}{V_m} \right)^n \cdot e^{\frac{t_m - t_a}{\alpha}} \dots\dots\dots (8)$$

L_a : V_a 및 t_a 에서의 實壽命時間(Hrs)
 L_n : V_n 및 t_m 에서의 保證壽命時間(Hrs)
 V_a : 印加電壓(V)
 V_m : 最大許用電壓(V)
 t_m : 最大許用溫度(°C)
 t_a : 稼動時 周圍溫度(°C)
 α : 常數(EIA RS-401 規定 B & D 特性

$$11.54)$$

n : 常數(EIA RS-401 規定 B & D 特性
 -5.36)

여기서 α , n 常數는 誘電體 構成, 電極構造에 따라 변하게 된다.

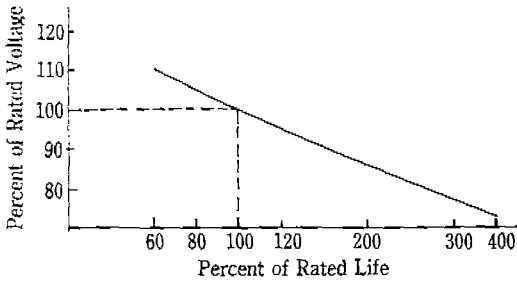
이와 같은 式(8)을 근거로 印加電壓과 周圍溫度에 의한 壽命時間의 變化推移 曲線을 그림 9, 10에 표시하였다.

그렇다면 이와 같은 推定式으로부터 Capacitor의 信賴度를 保證할 수 있는 試驗方法을 정의할 수 있다.

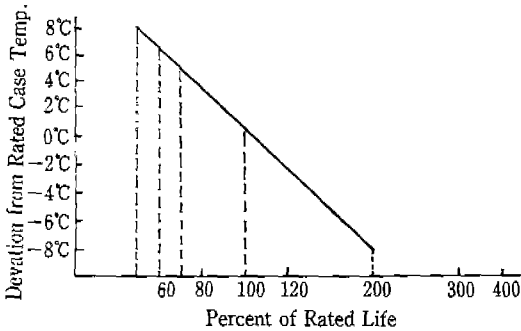
앞의 式(2)에서 설명된 바와 같이 1000Vdc, (1000+1000) μ F의 無效電力은 여유율 1.35를 제외하고 2189VAr이 된다. 따라서 EIA RS-

<표 4> 實稼動時間과 Claim 調査表

調査期間	'88. 6~'92. 10
適用台數	131臺
實稼動時間合計	1,673,600Hrs·臺
故障發生台數	'86. 6月, '91. 7月 各 1臺 總 2臺 發生



<그림 9> 一定 周圍溫度 條件下에서 印加電壓 變動에 따른 定格壽命 變化率 曲線圖



<그림 10> 一定 電壓條件下에서 周圍溫度 變化에 따른 定格壽命 變化 曲線圖

401 規定의 19절 高溫負荷試驗을 適用할 수 있다.

명시된 內容은 다음과 같다.

121%의 實効基準電壓을 印加하여 (500Hrs, 85°C Chamber내) 견딜 수 있어야 한다. 이와 같이 試驗할 경우 期待 壽命時間은 式(8)로부터

$$L_a = 500 \left(\frac{1.2 V_m}{V_m} \right)^{5.36} \cdot e^{\frac{11.4}{T-85}}$$

$$= 2.78 \times 1.54 \times 500$$

$$= 2143.7 \text{Hrs}$$

따라서 保證壽命 40,000Hrs, 殘存確率 95% 이상을 만족하려면 最小한 試料數는 364대, 試驗時間 500Hrs, 故障數는 1대까지 許用한다.

그러나 IEC 77 規定의 Rules for Electric Traction Equipment 3절의 Service Condition 에 의하면 最低·最高 周圍溫度 許用條件은 -25°C ~ +40°C로 規定되어 있다. 따라서 앞에서

基準溫度로 設定한 80°C보다는 中間值인 60°C로 設定하는 것이 보다 合理的이며 經濟的인 방법이다.

이 경우 期待 壽命時間은 다음과 같이

$$L_a = 500 (1.21)^{5.36} \cdot e^{\frac{11.4}{60-85}}$$

$$= 12,221 \text{Hrs}$$

가 되어 필요한 試料數는 64대이며, 不良 發生 臺數는 1대까지 許用한다.

64臺를 500時間 試驗할 경우 總 運轉時間은

64 × 12,221Hrs = 782,144Hrs 이며, 이중 故障數가 1대라면 故障率은

$$\lambda = \frac{1}{782,144} = 1.282 \times 10^{-6} / \text{Hrs}$$

$$R = e^{-\lambda t} = e^{-1.282 \times 10^{-6} / \text{Hrs} \times 40,000 \text{Hrs}} = 95\%$$

그러나 이것은 어디까지나 理論的인 確率에 의한 것이고 대개는 試驗上의 어려움 등이 따르기 때문에 製造者와 購買者가 협의하여 試料數를 5~10臺 정도로 결정하는 것이 일반적인 관례이다.

5. 結 論

지금까지의 언급된 SIV High Power DC Filtering Capacitor는 信賴度에 대한 概念的 접근과 客觀化된 國際規格을 適用하게 됨으로써 信賴度를 立證하게 되었을 뿐 아니라 關聯部品에 대해서도 評價技術을 한차원 높일 수 있는 계기가 되었을 것으로 믿는다. 또한 實제적인 Capacitor 設計技術을 체계화시킴으로써 Main Traction部 主電源側 Filtering Capacitor의 量產技術이 可能하게 되었다.

향후 需要 制限과 特殊性 때문에 소외되어 왔던 Power Electronics Capacitor (Commutation, Snubber, Resonance 등)에 대해서도 ESR 및 ESL의 最少化를 이루기 위한 設計技術 向上과 生産의 活性化를 위해 關聯업체가 共同으로 노력해야 할 것으로 본다.

또, Electric Traction System과 關聯된 裝備와 部品에 대한 評價技術의 定着化가 요구된다.