

配電線搬送 데이터通信에서의 주기적 임펄스노이즈의 발생특성

최 순 만* · 노 창 주**

The Originating Characteristics of Periodic Impulse Noises in the Data Communication System by Distribution Line Carrier Method

S. M. Choi · C. J. Noh

Key words : Distribution line carrier system(배전선 반송 시스템), Impulse noise(임펄스 노이즈), Switching power supply(스위칭 전원)

Abstract

The existence of periodic impulse noises in distribution line carrier(DLC) communication system is known to be the most serious obstacle for improving DLC communication quality in reliability and capacity. From the spectral points, impulse noises can be divided into baseband type and modulation type the noise width of whichs are much different each other. With each noise type, this study presents the basic characteristics in relation to what they originate from and how their spectrum properties are revealed. The baseband type impulse noise is normally caused from thyristor circuit running with low switching speed and the modulation type noise from the circuit of switching power supply. The base wave of modulation noise is shown to be the pulsatic charging current to primary condenser in switching power circuit. The study result indicates also that placing the DLC carrier frequency away the band predominated by modulated noise especially from RCC type switching power circuit is very important in DLC design.

1. 서 론

반송식통신은 본래 발전소나 변전소와 같은 고압송전 계통에서의 상호간 통신수단으로 활용되던 것이었으나 수전반이후의 구내에서 데이터통신시스템으로 이용하려는 방식으로 발전되었으며

이제는 이같은 배전선 반송식(Distribution Line Carrier system, DLC) 데이터통신은 Home Automation 이나 빌딩의 제어시스템에 있어서는 효과적이고 경제적인 통신수단의 하나로 널리 인식되고 있다.

DLC는 그것의 특성상 선박에서 활용되는 경우

* 정회원, 한국해기연수원

** 정회원, 한국해양대학교

무선통신이 곤란한 선체 강제격벽간을 광범위하게 연결하는 통신선로가 쉽게 얻어지는 것 뿐 아니라 선로 자체의 강인성도 매우 큰 장점이 있다. 따라서 화재와 같은 사고로 기존의 전화통신망이나 제어시스템의 데이터링크 선로망이 망실되는 경우에는 이들 기능을 부분적으로 대신하여 예비 비상통신망으로서의 역할을 함으로서 운항안전에 도움이 될 수 있다.

배전선로를 신호전송 선로로 이용하는 DLC 통신은 본질적으로 계통으로부터의 노이즈영향을 심하게 받을 수 밖에 없으며 특히 전원주파수에 동기된 주기적 임펄스노이즈의 존재는 DLC 통신에 가장 지배적인 악영향을 주게 된다¹⁻³⁾. 근래에는 배전선에 접속되는 각종 전기전자 제품들의 종류가 다양해짐에 따라 DLC가 받는 임펄스노이즈의 특성 또한 크게 변질되었으며 그 강도도 점증되고 있으므로 이러한 노이즈 환경과 특성에 대한 연구는 DLC 통신성능의 개선을 위해서는 빼놓을 수 없는 중요한 문제로 대두된다.

수신측 대역필터를 거쳐서 나타나는 배전계통의 임펄스노이즈는 노이즈파형의 펄스폭 모양에 따라 크게 두가지 형태로 구분된다. 본 논문에서는 이들을 주파수특성에 따라 펄스폭이 매우 좁은 비변조성 임펄스노이즈와 또한 상대적으로 큰 노이즈폭을 나타내는 변조성 노이즈로 나누어 양 노이즈에 대한 발생원인과 주파수성분을 분석해 보기로 한다. 이를 통해 시간영역에서 나타나는 임펄스노이즈의 펄스폭에 대한 일반특성을 주파수영역에서 그 원인을 해석하도록 하고 특히 변조성 노이즈와 스위칭레귤레이터 전원의 동작구조에 따른 연관성에 대해서 고찰해 보도록 한다.

2. 임펄스노이즈의 종류

DLC에서는 백색 가우시안 잡음이나 단발성 임펄스노이즈보다는 상용전원에 동기된 주기적 임펄스노이즈의 영향이 특히 크게 작용한다. 이러한 주기적 임펄스노이즈의 전력스펙트럼밀도는 가우시안 배경잡음에 대해 20dB 이상의 큰 강도를 갖는 것이 보통이며 시간영역에서 나타나는 임펄스의 진폭과 주기 및 폭은 DLC의 전송에러율에 결

정적인 영향을 미치게 된다^{3,4)}. 따라서 확정적 신호의 성격으로 작용하는 DLC와 같은 노이즈환경에서는 가우시안 분포를 기초로 한 다음과 같은 데이터 전송에러율의 일반식은 적용되기가 곤란하다.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{S}{2N}} \quad (1)$$

식(1)은 相補吳差函數이며 S와 N은 각각 신호전력과 잡음전력을 나타낸다. 가우시안 분포를 따르지 않는 이러한 주기적이고 규칙적인 배전계통의 노이즈 종류는 전형적으로 Fig.1 및 Fig.2와 같은 두 가지 경우로 구분될 수 있으며 이들 파형은 노이즈를 고주파대역의 BPF를 통해 협대역 노이즈로 필터링하였을 때의 출력파형으로 나타낸 것이다.

Fig. 1과 Fig. 2의 노이즈특성과 발생원인은 서

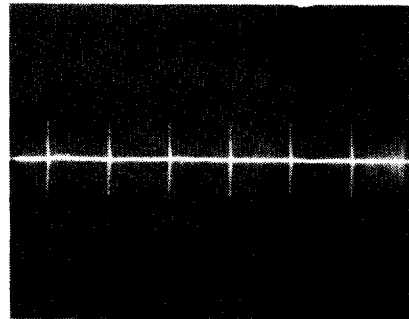


Fig. 1 Baseband Type Impulse Noise (X : 5ms/div).

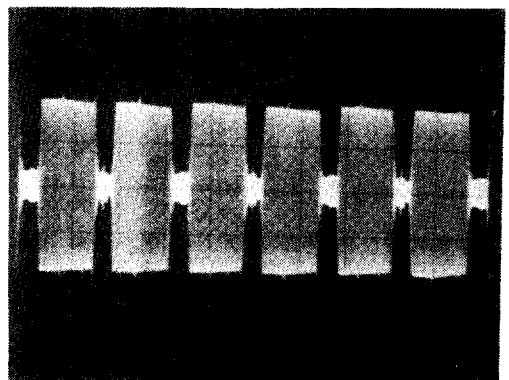


Fig. 2 Modulation Type Impulse Noise (X : 5ms/div).

로 크게 다르므로 여기서는 이들 각각을 비변조성 임펄스노이즈와 변조성 임펄스노이즈로 나타내어 특성을 비교하도록 한다. Fig. 2는 배경잡음이 페이딩 간섭의 영향으로 나타나는 변조성 노이즈의 전형적인 파형모습이며 감쇠부분의 노이즈폭은 약 1.7ms 정도이다⁴⁾. Fig. 1과 Fig. 2의 파형으로부터 두 노이즈의 주기는 120Hz로 서로 같으나 펄스폭 τ 는 변조성 노이즈경우가 비변조성 노이즈에 비해 훨씬 큰 노이즈폭을 갖는다는 것을 알 수 있다.

3. 비변조성 임펄스노이즈

노이즈폭이 좁고 날카로운 모양을 나타내는 비변조성 임펄스노이즈는 다이리스터 위상제어 정류회로와 같은 저속 스위칭동작의 전원회로에서 발생되며 스위칭 기본파에 의한 스펙트럼 성분만으로 직접 DLC에 영향을 미치는 노이즈이다. 이러한 좁은 펄스폭 형상은 부하조건이나 배전계통의 시변적 전달특성 및 BPF의 통과대역주파수에도 영향을 받음이 없이 일정하게 나타난다. 배전계통에서 수신되는 비변조성 노이즈파형 $n(t)$ 를 일반식으로 표현하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다⁵⁾.

$$n(t) = n_w(t) + \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^6 a_i \delta\left(t - jT - i\left(\frac{T}{6} + \Delta T_i\right)\right) \quad (2)$$

여기서 $n_w(t)$ 는 배경잡음이며 T 는 전원주파수에 의한 주기 16.6ms이고 ΔT 는 스위칭 위상지연각을 나타낸다. 식(2)를 단상교류에서 양파 스위칭조건으로 하면 식(3)을 얻는다.

$$n(t) = n_w(t) + \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j \delta\left(t - j\left(\frac{T}{2} + \Delta T_j\right)\right) \quad (3)$$

식(3)의 노이즈를 일으키는 원인파형인 다이리스터의 스위칭 전류파형은 저항부하에서 식(4)의 푸리에급수로 나타나며 α 는 전류위상각이다.

$$i(t) = \frac{2A_m}{\pi} \sum_{n=3,5}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} [(n \cos m\alpha \sin \alpha - \sin m\alpha \cos \alpha) \sin n\omega_0 t + (n \sin n\alpha \sin \alpha + \cos n\alpha \cos \alpha + 1) \cos n\omega_0 t] \quad (4)$$

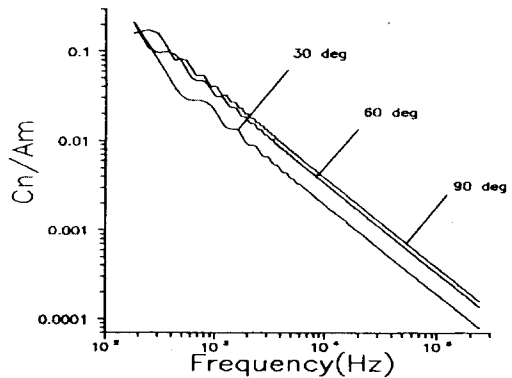


Fig. 3 Spectral Attenuation of Baseband Impulse Noise.

식(4)로부터 진폭 푸리에계수에 의해 스위칭 위상각에 대한 감쇠경향을 나타내면 Fig. 3과 같다.

노이즈의 강도는 전류각 90도인 때에 가장 크며 주파수 증가에 대한 스펙트럼 감쇠경향은 -20dB/dec를 나타낸다. 전류각 120도와 150도의 경우는 각각 전류각 60도와 30도인 파형과 상보적인 파형 관계에 있으므로 그 포락선은 동일한 모양을 갖게 된다

4. 변조성 임펄스노이즈

4.1 스위칭레귤레이터 전원

스위칭 전원은 상용전원과 직결되는 오프라인 구조이므로 고주파신호인 스위칭노이즈는 전원트랜스에 의해 감쇠되는 효과도 없이 계통내에 바로 파급되어진다. 절연용트랜스를 경계로 한 인버팅 작동방법에 따라 스위칭 전원은 플라이백방식, 포워드방식, 푸쉬풀방식, 하프브리지방식, 풀브리지방식으로 나뉘어지며 이중 DLC에 미치는 노이즈 영향이 가장 큰 플라이백 방식을 중심으로 스위칭 전원의 작동구조와 노이즈특성을 DLC의 문제와 연관시켜 본다.

4.1.1 RCC 방식 전원회로

자려식 플라이백 방식의 대표적인 것으로는 RCC(Ringing Choke Converter) 전원이 있으며 스위칭 동작은 블로킹 발진형태로 이루어진다. 별도의 구동회로가 필요치 않아 회로구성이 간단하

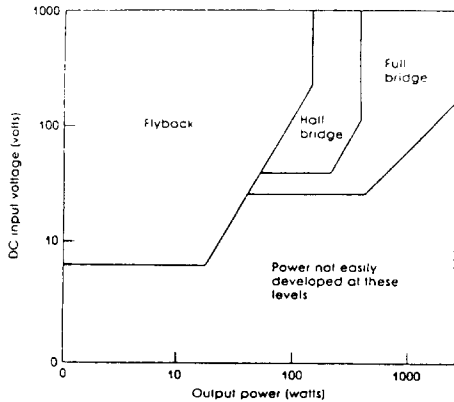


Fig. 4 Favorite Application of DC Switching Power Supply Type.

고 구조적으로 비교적 낮은 스위칭 주파수로 작동되나 근래에는 이 방식에서도 100 - 200KHz의 스위칭속도가 보통이다.

스위칭 전원방식과 용도는 Fig. 4와 같으며⁶⁾ 퍼스널컴퓨터와 주변장치들과 같은 소용량의 전원장치는 RCC 방식이 주로 사용된다는 것을 알 수 있다. 컴퓨터사용이 일반화되어 부속되는 주변장치들과 함께 이들 장치내의 RCC 방식 전원의 분포되는 개수가 크게 증가되고 있으므로 이들로부터 발생하는 노이즈파급은 계통내의 노이즈분포와 강도 및 스펙트럼특성에 주도적인 영향을 미치게 된다.

Fig. 5는 RCC 전원의 스위칭구조이다.

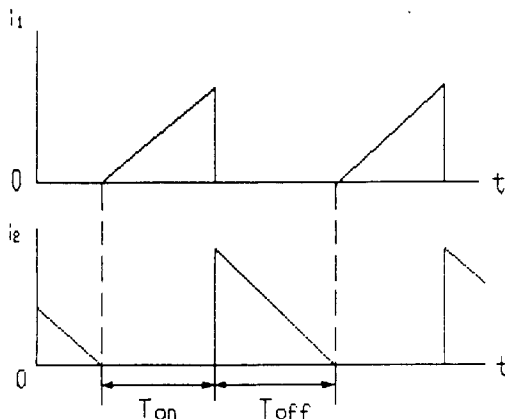


Fig. 5 Switching Operation in Flyback Circuit.

i_{11} 과 i_{22} 는 각각 도통시의 차단시의 트랜스 1, 2 차측 전류이며 순차적인 작동이므로 i_1 과 i_2 가 겹치는 구간이 생기지 않는다. RCC 회로는 역방향 결합된 트랜스를 경계로 스위칭소자의 T_{on} 도통기간중에 흐르는 1차코일의 전류를 자기에너지로 축적한 후 T_{off} 차단중에 트랜스 2차코일에서 발생하는 유도전기를 부하에 흘려 보내는 방식으로 컨버팅동작된다. 전력의 입출력 관계로부터 구해지는 스위칭주파수 f 는 식(5)와 같다.

$$f = \frac{1}{T_{on} + T_{off}}$$

$$= \frac{1}{2I_o} \left[\frac{V_1 \cdot V_2}{V_2 \cdot \sqrt{L_p} + V_1 \cdot \sqrt{L_s}} \right]^2 \quad (5)$$

I_o : 직류부하전류,

L_p : 1차코일의 인덕턴스,

L_s : 2차코일의 인덕턴스

V_1 : 입력전압

V_2 : 출력전압

식(5)로부터 RCC의 스위칭 주파수는 부하전류에 반비례하므로 정격 최대부하에서 가장 낮고 저부하일수록 높아지는 가변주파수 특성을 나타낸다^{6,7)}. 이와 같이 RCC 전원회로는 배전계통내에 다수 산재될 뿐 아니라 그것이 갖는 스위칭 주파수가 비교적 DLC의 반송주파수에 근접해 있고 또한 스위칭 주파수가 가변적이므로 DLC의 반송주파수 대역과 중첩되는 경우가 많아져서 DLC 통신에 미치는 영향은 특히 커지게 된다.

4. 1. 2 파워드컨버터

용량이 보다 큰 곳에 적용되는 파워드컨버터 및 하프브리지 방식의 스위칭동작은 타러식의 PWM 제어로 행해지므로 회로는 복잡하나 효율과 동작 안정성이 높고 동작주파수가 부하에 관계없이 고정되므로 노이즈강도는 제한된 점역대역폭에서만 크게 작용할 뿐이다. 따라서 노이즈회피가 비교적 용이하고 또한 스위칭 주파수의 크기가 500KHz 이상의 고주파동작이 보통이므로 RCC 방식에 비하여 DLC에 미치는 영향은 작다고 할 수 있다.

4.2 변조성 노이즈의 원인파형

스위칭전원의 입력단은 어느 것이나 콘덴서 입력형의 브리지 양과정류로 인버터작동에 필요한 직류전원을 공급하게 된다. 정류회로에 이어지는 1차 평활용 콘덴서에 흐르는 충전전류는 Fig. 6에서와 같이 전원측 전압이 충전전압보다 커지는 최대치 부근에서 날카로운 펄스성 맥동전류의 파형으로 나타난다.

충전전류의 주파수는 120Hz로 전원에 동기되고 펄스폭 τ 는 전원전압에 반비례된다. 입출력의 전력이 동일하다면 식(6)으로부터 펄스폭 τ 와 부하전류의 관계를 나타낼 수 있다. E_0, I_0 는 직류 출력전압과 전류이며 T 는 주기, E_m 은 교류전원의 최대치이다.

$$E_d I_d T = 120 E_m i_p \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \cos 240\pi t \cos \frac{\pi}{T} t dt \quad (6)$$

부하전류와 충전 전류파형의 면적전류는 비례되므로 부하증가에 따라 펄스폭 τ 와 진폭 i_p 가 함께 증가됨이 예상되나 면적전류의 증가는 대부분 i_p 에 의해 주도되므로 펄스폭 τ 의 변화는 상당히 작아져서 실제의 파형관찰로는 전부하시와 무부하시의 펄스폭 차이는 20퍼센트 이내로 확인된다.

펄스성 전류파형을 스위칭전원회로에서 평활용 콘덴서 입력단으로부터 측정하면 Fig. 7과 같이 나타나며 아래의 파형은 BPF 출력에서 얻어지는 변조성 노이즈로서 백색가우시안 배경잡음이 변조성 노이즈에 의해 간섭되어 페이딩 감소된 모양이다.

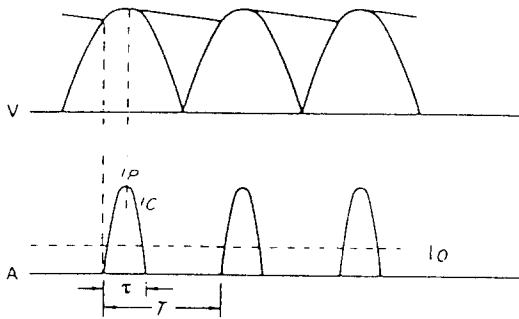


Fig. 6 Pulsatory Charging Current to Primary Condenser.

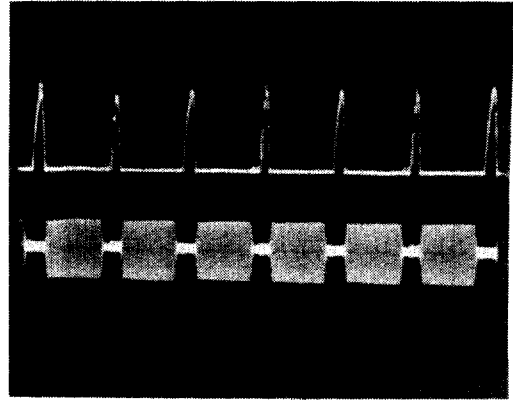


Fig. 7 Pulsatory Charging Current and Modulated Impulse Noise. (X : 5ms/div)

Fig. 7은 평활용 콘덴서의 충전전류파형과 변조성 노이즈의 파형이 주파수, 발생위상 및 펄스폭의 면에서 비교될 때 서로 정확히 일치되는 관계를 나타낸다. 따라서 이러한 양자의 시간적 상관성과 동기성으로부터 배전계통의 변조성 노이즈는 스위칭전원의 펄스성 충전전류에서 비롯된다고 할 수 있으며 충전전류가 변조성 노이즈의 변조 신호 파형으로 작용하였음을 알 수 있다.

4.3 주파수특성

펄스성 충전전류의 기본파형 $f(t)$ 는 펄스폭을 τ 라 놓으면 식(7)과 같이 모델링된다.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_m u\left(t - kT + \frac{\tau}{2}\right) u\left(kT + \frac{\tau}{2} - t\right) \cos \frac{\pi}{T} t \quad (7)$$

식(7)의 푸리에급수를 구하여 주파수에 대한 감쇠특성을 진폭 스펙트럼으로 나타내면 Fig. 8과 같다.

펄스성 충전전류의 주파수특성은 저주파의 좁은 대역에 스펙트럼밀도가 집중되고 -40dB/dec 의 감쇠포락선을 나타낸다. DLC 반송주파수대역인 100KHz 부근에서는 -110dB 이하이므로 충전전류파형 자체로는 DLC에 미치는 노이즈 세력은 무시될 정도로 작은 것임을 알 수 있다. 노이즈의 측정에 이용된 대역필터의 중심주파수와 필터 출력 파형을 근거로 판단하면 변조성 노이즈는 충

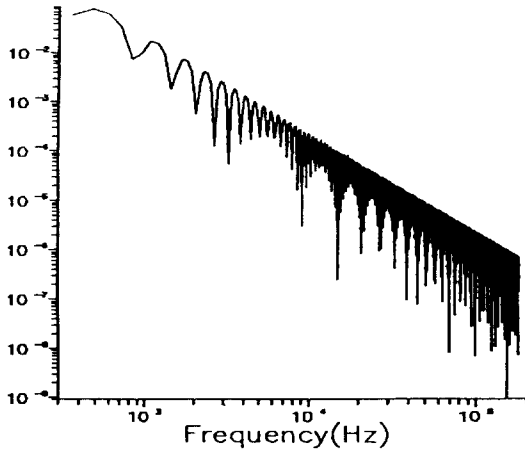


Fig. 8 Spectral Attenuation of Charging Pulsuatic Current.

전전류파형이 별도의 고주파신호에 의해 고주파 변조된 형태의 노이즈임을 알 수 있으며 따라서 저주파대역에 스펙트럼밀도가 집중될 뿐인 충전전류파형은 고주파대역에서도 그대로 같은 파형의 형상을 유지한 채 큰 노이즈 세력을 나타내게 된다. 이러한, RCC 전원회로의 동작과정으로부터 인버팅을 위한 고주파 스위칭파형은 앞단에서 발생하는 기본파로서의 충전 전류파형을 고주파 변조시킴으로서 충전전류파형은 스위칭 주파수를 중심주파수로 하는 협대역노이즈로 변환된 것이라고 할 수 있다.

5. 노이즈폭의 특성비교

DLC 수신파형에 나타나는 비변조성과 변조성 노이즈는 펄스폭 τ 가 서로 크게 다르다는 특징을 보였으나 이것은 각각의 발생구조에서 나타나는 주파수성분의 차이 때문임이 예상되므로 양 노이즈신호의 원인인 기본파형이 갖는 스펙트럼밀도와 고주파대역의 수신측 BPF 출력신호에서 나타나는 스펙트럼밀도를 각각 비교해 보기로 한다.

다이리스터에 의한 비변조성 임펄스노이즈가 갖는 스펙트럼성분은 위상제어 전류파형으로부터 복소 푸리에계수를 구하면 식(8)이 되므로 스펙트럼분포는 Fig. 9와 같이 나타난다.(전류각은 90도로 계산)

$$C_k = \frac{1}{2\pi(n^2 - 1)} \left(1 - 2n \sin \frac{n\pi}{2} - \cos n\pi \right) \quad (8)$$

한편 변조성 노이즈를 일으키는 펄스성 충전전류의 푸리에 계수는 식(10)이 되고 이것의 스펙트럼 윤곽을 $\tau=1.7\text{ms}$ 로 하여 구하면 Fig.10과 같이 나타난다.

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} A_m \cos \frac{\pi}{T} t e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (9)$$

$$= \frac{2A_m \tau T}{\pi(T^2 - 4n^2 \tau^2)} \cos n\pi \frac{\tau}{T} \quad (10)$$

Fig. 9과 Fig. 10으로부터 다이리스터 스위칭파형의 스펙트럼분포는 상대적으로 넓게 퍼져 있으나 이에 비해 펄스성 충전전류의 스펙트럼은 기본 주파수 부근에 매우 밀집되어 있는 형상이다. 펄스파형의 펄스폭 크기와 파형의 스펙트럼밀도의 이산관계에서도 볼 수 있듯이 스펙트럼분포가 이산적일수록 그것의 시간함수 파형은 보다 좁고 날카로운 파형으로 나타나게 된다. Fig. 9와 Fig. 10의 경우 상대적으로 더 날카로운 다이리스터 스위칭파형이 보다 넓은 스펙트럼 분포를 나타내는 것은 이러한 일반적인 성질로 설명될 수 있다.

임펄스노이즈를 대역폭 ω_b 인 BPF를 통한 경우 그 출력은 식(11)과 같은 협대역노이즈신호 $n(t)$ 가 된다.

$$\begin{aligned} n(t) &= a(t) \cos \omega_b t + b(t) \sin \omega_b t \\ &= c(t) \cos(\omega_b t + \phi) \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)의 $c(t)$ 는 저주파성분이므로 펄스파형의 시간함수를 나타낸다. 저속 스위칭작동으로부터 발생하는 비변조성 노이즈는 Fig. 9와 같이 감쇠정도가 작은 스펙트럼분포의 노이즈가 일정 대역폭의 BPF를 통하므로 이 때의 필터 출력신호가 갖는 스펙트럼은 사각 형상으로 스크린되어 스펙트럼 밀도는 대체로 BPF의 전체 통과대역에서 일정한 높이로 꼭 차있는 형상으로 출력된다. 반면 변조성 노이즈는 Fig. 10의 기본파가 갖고 있는 좁은 스펙트럼형상이 그대로 ω_b 의 고주파대역으로 천이변조된 것이므로 동일한 주파수 대역폭의 BPF로 수신되는 경우 노이즈 $c(t)$ 가 갖는 스펙트럼성분은

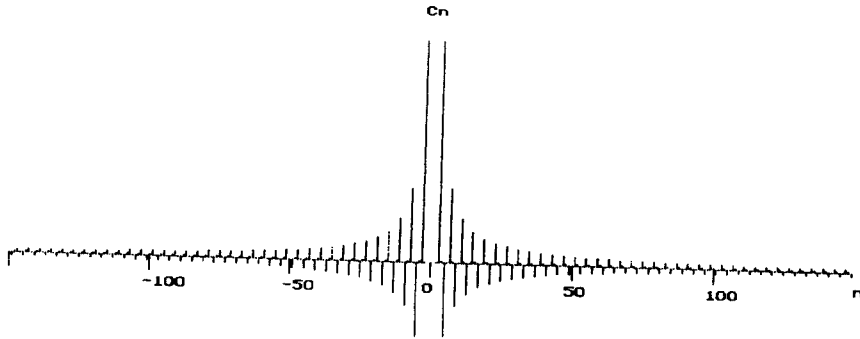


Fig. 9 Spectrum from Phase Controlled Switching Thyristor.

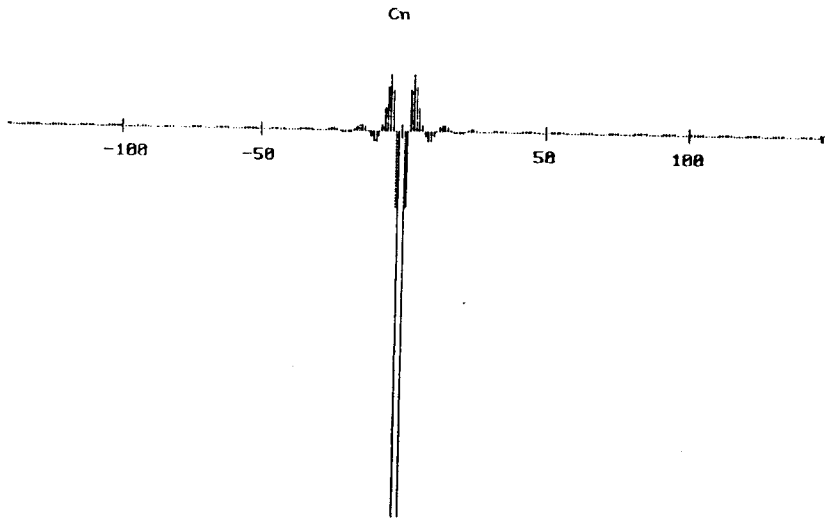


Fig. 10 Spectrum of Charging Current at Primary Condenser.

좁은 기본파 파형의 스펙트럼 분포형상이 그대로 답습되어 나타난다.

이러한 양자의 관계로부터 ω_b 의 고주파대역에서 $c(t)$ 가 갖는 스펙트럼 밀도는 역시 기본파에서의 스펙트럼 이산특성과 기본적으로 다르지 않음을 알 수 있으며 따라서 각각의 펄스폭에 대한 특징은 DLC 대역에서도 그대로 존속된다고 할 수 있다.

6. 결 론

계통내에 존재하는 주기적 임펄스노이즈의 발생원인과 특성을 두가지의 유형으로 구분하여 해석하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) DLC에서의 임펄스노이즈는 노이즈파형의 스펙트럼해석으로부터 변조성의 유무에 따라 저속 스위칭의 다이리스터회로에서 비롯되는 좁은 펄스폭의 비변조성 노이즈와 고속스위칭의 스위칭레귤레이터 전원회로에서 비롯되는 넓은 펄스

폭의 변조성 노이즈로 구분될 수 있다.

2) 변조성 노이즈는 스위칭전원의 펄스성 충전 전류가 원인파형이며 이 파형이 고주파 스위칭주파수에 의해 천이변조된 결과가 변조성 노이즈로 나타난다.

3) 변조성 노이즈와 스위칭전원의 펄스성 충전 전류는 동기적이므로 노이즈의 발생위상은 상용전원의 전압파형에서 최대치부근에 한정되며 펄스폭의 변화는 매우 작게 나타난다.

4) 비변조성 임펄스노이즈와 변조성 임펄스노이즈의 펄스폭이 다른 이유는 발생구조가 다름에서 오는 스펙트럼 분포의 차이로 설명될 수 있다.

5) 변조성 임펄스노이즈를 가능한 회피하기 위해서는 DLC의 반송주파수를 특히 RCC 방식 스위칭전원에서 발생하는 가변적 주파수특성의 노이즈대역에서 벗어나도록 선정할 필요가 있다.

이러한 배전계통의 노이즈특성연구를 기초로 노이즈 종류에 따른 회피방법의 모색이 구체화될 수 있을 것으로 생각되며 특히 변조성 노이즈에 대해서는 상용전원에 대해 위치하는 노이즈위상이 일정하고 제한적이라고 하는 점과 관련하여 신호전송 위상을 선별하여 불연속적으로 처리함으로써 전송속도를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 예상되므로 이에 대한 실험연구를 추후의 과제로 남겨두기로 한다.

참고문헌

- 1) Roger M.Vines, H.Joel Trussell, Louis J. Gale, and J.Ben O'neal,Jr. "Noise on residential power distribution circuits", IEEE Trans. on Electromagn. Compat., Vol. EMC - 26, pp. 161 - 168, Nov. 1984
- 2) Morgan H.L.Chan and Robert W. Donaldson, "Amplitude, Width, and Internarrival Distributions for Noise Impulses on Intrabuilding Power Line Communication Networks", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. EMC - 31, pp. 320 - 323, August 1989.
- 3) Morgan H.L.Chan and Robert W. Donaldson, "Attenuation of communication signals on residential and commercial intrabuilding power distribution circuits", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. EMC - 28, pp. 220 - 230, Nov.1986
- 4) 박준현, 김남용, 강창연 "전력선채널의 데이터전송 특성개선을 위한 고조파잡음제거에 관한 연구" 한국통신학회논문지 91 - 3 Vol. 16 No. 3
- 5) H.J. Trussell and J.D.Wang "The effect of Hard Limiters on Signal Detection in Harmonic Noise Using Adaptive Noise Cancellation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWRD - 1, No. 1, Jan. 1986
- 6) Marty Brown, "Practical switching power supply design", Academic Press, Inc. 1990
- 7) Chryssis Gorge, "High Frequency Switching Power Supplies", McGraw - Hill, 1984