

분기콘덴샤와 분기려파기가 있는 고효율의 E급전력증폭기에 대한 연구

리철화, 박광철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《체신부문 과학자, 기술자들은 우리 나라의 실정과 체신발전의 세계적추세에 맞게 새로운 통신수단과 방식기술, 정보통신체계에 대한 연구사업을 힘있게 벌려야 합니다.》
(《김정일선집》 증보판 제17권 423페이지)

현대무선통신체계에서는 전력증폭기가 높은 효율, 좋은 선형성 및 작은 고조파출구 준위 등을 동시에 보장할것을 요구한다.[1]

분기콘덴샤가 있는 절환식E급전력증폭기[1-3]들은 그것들의 설계간명성과 높은 조 작효율로 하여 광범히 응용되였다.

그림 1의 ㄱ)에 보여준바와 같이 그것들의 회로부하할당은 분기콘덴샤, 직렬유도도 그리고 높은 수준에서 고조파를 억제하기 위한 L_0C_0 에 동조된 직렬려파기로 되어있다. 이 경우에 3극소자는 여닫개처럼 동작하며 전류와 전압파형의 위상은 큰 전류와 높은 전압이 동시에 겹치지 않도록 하여 전력손실을 최소화하고 전력증폭기의 효율을 최대 로 한다.

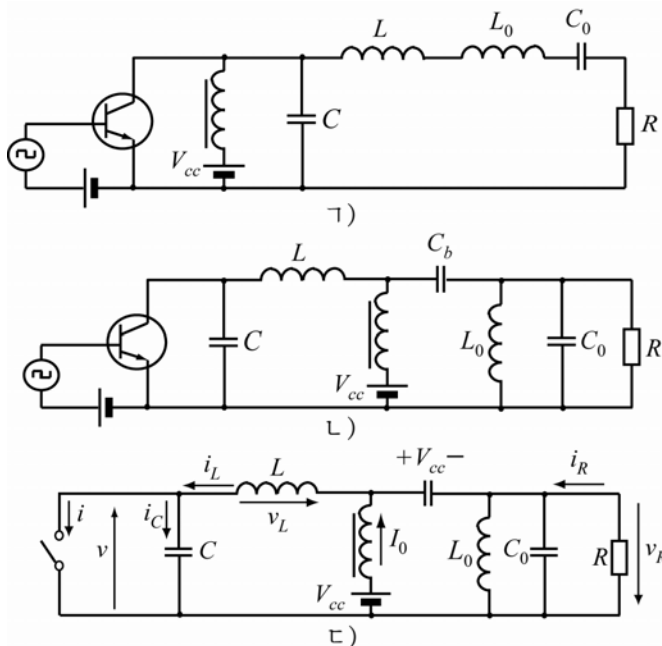


그림 1. 분기려파기가 있는 E급전력증폭기의 기본회로

론문에서는 직렬려파기대신에 분기려파기가 리용되는 분기콘덴샤와 직렬려파기가 있는 E급방식을 제안하였다.

새로운 회로부하할당으로 E급절환조건뿐만아니라 넓은 주파수대역에 걸쳐 높은 효율을 가진 광대역능력도 제공할수 있다.

론문에서는 회로에 대한 세밀한 분석, 최량의 전압 및 전류파형들과 회로부하파라미터들의 유도, 전송선회로부하설계방법들을 제안하여 분기콘덴샤와 분기려파기가 있는 E급방식에 대한 이론적인 가정, 모의와 실험적인 결과들을 해석하고 검증하였다.

1. 회로 분석

분기콘덴샤와 분기려파기가 있는 단일말단E급전력증폭기의 최적파라미터들은 그것의 안정한 수전극전압과 전류파형들의 분석에 기초하여 결정될수 있다.

그림 1의 ㄴ)는 분기콘덴샤와 분기려파기가 있는 E급전력증폭기의 기본회로구성을 보여주는데 여기서 회로부하는 분기콘덴샤 C , 직렬유도도 L , 분리콘덴샤 C_b , L_0C_0 에 동조된 기본분기회로, 부하저항 R 로 구성된다.

그림 1의 ㄷ)에서 보여준 분기려파기가 있는 단일말단E급전력증폭기의 해석을 간단히 하기 위하여 몇가지 가정을 하였다.

수전극효율이 이상적일 때 직류전력 $P_0 = I_0 V_{cc}$ 와 부하로 전달되는 기본주파수출구전력 $P_{out} = V_R^2 / (2R)$ 는 같다. 즉

$$I_0 V_{cc} = \frac{V_R^2}{2R} \quad (1)$$

이다.

직류전류 I_0 은 푸리에합렬전개로 다음과 같이 결정할수 있다.

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t = \frac{V_{cc}}{2\pi\omega L} \left[\frac{\pi^2}{2} - \frac{V_R}{V_{cc}} (2\sin\varphi + \pi\cos\varphi) \right] \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 리용하여 최적표준화된 직렬유도도 L 에 대한 방정식을 다음과 같이 유도할수 있다.

$$\frac{\omega L}{R} = \frac{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi^2}{2} - \frac{V_R}{V_{cc}} (2\sin\varphi + \pi\cos\varphi) \right]}{\left(\frac{V_R}{V_{cc}} \right)^2} \quad (3)$$

여기로부터 최적의 표준화된 직렬유도도 L , 분기콘덴샤 C 를 계산할수 있다.

$$\frac{\omega L}{R} = 1.4836 \quad (4)$$

$$\omega CR = 0.261 \quad (5)$$

최량부하저항 R 는 직류공급전압 V_{cc} 와 부하에 전달되는 기본주파수출구전력 P_{out} 에 대하여 다음과 같이 얻을수 있다.

$$R = \frac{1}{2} \frac{V_R^2}{P_{out}} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_R}{V_{cc}} \right)^2 \frac{V_{cc}^2}{P_{out}} = 0.4281 \frac{V_{cc}^2}{P_{out}} \quad (6)$$

2. 회로 설계

분기콘덴샤와 분기려파기가 있는 효률이 높은 전송선E급전력증폭기의 설계를 보자. 부하전저항은 다음과 같이 얻어진다.

$$Z_{net} = Z_1 \frac{R_L(Z_2 - Z_1 \tan 30^\circ \tan 60^\circ) + jZ_1 Z_2 \tan 60^\circ}{Z_1 Z_2 + j(Z_1 \tan 30^\circ + Z_2 \tan 60^\circ)R_L} \quad (7)$$

여기서 Z_1 과 $\theta_1 = 60^\circ$ 는 직렬전송선의 특성전저항과 전기적길이이며 Z_2 와 $\theta_2 = 30^\circ$ 는 개방토막선의 특성전저항과 전기적길이이다.

여기로부터 부하와의 복소공액정합은 특성전저항 Z_1 과 Z_2 의 적당한 선택으로 얻을 수 있다.

식 (7)을 실수 및 허수부분들로 분리하고 $\text{Re}Z_L = R$ 와 $\text{Im}Z_L = 0$ 임을 고려하면 2개 미지파라미터들이 있는 2개 방정식들을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$(Z_1 + 3Z_2)^2 R_L^2 R - 3Z_1^2 Z_2^2 (4R_L - 3R) = 0 \quad (8)$$

$$3Z_1^2 Z_2^2 + R_L^2 (Z_1 + 3Z_2)(Z_2 - Z_1) = 0 \quad (9)$$

식 (8), (9)로부터 특성전저항 Z_1 과 Z_2 를 계산할 수 있다.

이 두 식들은 파라미터 $r = R_L / R$ 의 함수로서 풀면 다음과 같이 된다.

$$\frac{Z_1}{R_L} = \frac{\sqrt{4r-1}}{\sqrt{3r}} \quad (10)$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{r-1}{r} \quad (11)$$

결과 분기콘덴샤와 분기려파기가 있는 E급에서 요구되는 최량부하저항 R , 표준부하 $R_L = 50\Omega$ 일 때 파라미터 r 의 특정한 값에 대하여 먼저 특성전저항 Z_1 은 식 (10)으로부터 계산하고 그다음 특성전저항 Z_2 는 식 (11)로부터 계산한다.

실례로 요구되는 최량부하저항이 $R = 20\Omega$ 과 같다면 $r = 2.5$ 일 때 직렬전송선의 특성전저항은 $Z_1 = 35\Omega$, 개방토막선의 특성전저항은 $Z_2 = 58\Omega$ 이다.

분기려파기가 있는 전송선 GaN HEMT E급전력증폭기에 대하여 모의하면 83%의 배출극효율, 80.4%의 전력추가효율, 15dB의 전력증폭도 등이 얻어진다. 2차와 3차고조파는 50dB이상 억제된다.

수전극전압피크인자를 감소시키기 위하여 3차고조파에 동조된 직렬공진회로를 직렬려파기가 있는 E급회로부하로 리용할 수 있다.

이 경우 이 집중회로의 입구에서 기본주파수의 회로무효저항 $\text{Im}Z_{net}$ 는 다음과 같다.

$$\text{Im}Z_{net}(\omega_0) = \omega_0 L_1 + \frac{\omega_0 L_2}{1 - \omega_0^2 L_2 C_2} = \omega_0 L \quad (12)$$

여기서 L_1 은 직렬유도도이며 직렬 $L_2 C_2$ 공진회로는 2차고조파에 동조된다.

$$1 - 4\omega_0^2 L_2 C_2 = 0 \quad (13)$$

식 (12)를 3차고조파($\omega = 3\omega_0$)에서 단락조건을 얻기 위하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Im}Z_{net}(3\omega_0) = 3\omega_0 L_1 + \frac{3\omega_0 L_2}{1 - 9\omega_0^2 L_2 C_2} = 0 \quad (14)$$

결과 회로부하파라미터들사이의 비율은 다음과 같이 얻어진다.

$$L_1 = \frac{3}{8}L \quad (15)$$

$$L_2 = \frac{15}{32}L \quad (16)$$

$$C_2 = \frac{8}{15\omega_0^2 L} \quad (17)$$

여기서 L 은 식 (4)에 의하여 정의된 최적유도도이다.

단락려파기가 있는 집중형E/F₃급전력증폭기를 100MHz의 동작주파수에서 모의하면 무한대의 유도성부하일 때 40dBm의 출구전력, 89.2%의 배출극효율, 전력증폭도가 16dB인 87%의 PAE를 얻었다.

3. 회로 성능

효율이 높은 E급전력증폭기를 설계하자면 일반적으로 소자출구에서 필요한 고조파 전저항조건을 만족시키고 부하로 시누스파전류가 흐르도록 하여야 하는데 그러자면 큰 부하를 련결해야 한다. 전력증폭기들에서 대역이 제한되는것은 절환주파수 f_T 가 낮고 출구용량 C_{out} 가 크기때문이다.

GaN HEMT기술은 높은 효율, 큰 파괴전압, 높은 전력밀도와 높은 절환주파수, 작은 결면을 가진것으로 하여 높은 광대역성능을 가능하게 한다. 또한 작은 입출구용량과 기생진동을 가진다.

무효저항보상을 보기 위하여 그림 3과 같은 분기콘덴샤 C , 직렬유도도 L , 기본주파수에 동조된 E급의 등가회로를 고찰한다.

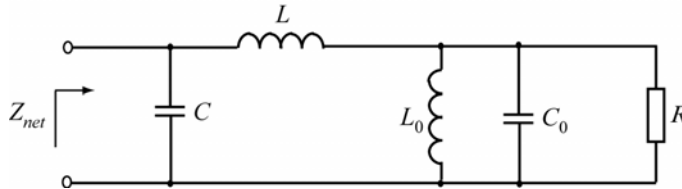


그림 2. 분기콘덴샤 C , 직렬유도도 L , 기본주파수에 동조된 E급의 등가회로

넓은 주파수대역에서 부하위상각을 상수로 유지하기 위해서는 L 에 의하여 생기는 무효저항의 정의 경사가 병렬 L_0C_0 에 의하여 생기는 무효저항의 부의 경사에 의하여 상쇄되어야 한다.

이 경우에 회로부하의 완전전도도 $Y_{net} = 1/Z_{net}$ 를 다음과 같이 쓸수 있다.

$$Y_{net} = j\omega C + \frac{1 + j\omega' C_0 R}{R(1 - j\omega\omega' L C_0) + j\omega L} \quad (18)$$

여기서

$$\omega' = \omega \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right) \quad (19)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (20)$$

은 공진주파수이다.

분기콘덴샤와 분기려파기가 있는 정격E급방식의 표준화된 직렬유도도 L 과 분기콘덴샤 C 는 각각 식 (4)와 (5)에 의하여 결정된다.

일정한 부하위상각을 가질 때 주파수대역은 중간주파수 ω_0 에서 최대로 된다.

$$\left. \frac{dB_{net}(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = 0 \quad (21)$$

여기서 회로부하의 무효저항 $B_{net} = \text{Im}Y_{net}$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$B_{net} = \omega C + \frac{\omega' C_0 R^2 (1 - j\omega\omega' LC_0) - \omega L}{R^2 (1 - j\omega\omega' LC_0) + (\omega L)^2} \quad (22)$$

결과 추가적인 방정식을 다음과 같이 유도할수 있다.

$$2\omega_0 C_0 R - \frac{\omega_0 L}{R} - \omega_0 C R \frac{\left(\frac{\omega_0 L}{R}\right)^2 + 1}{\left(\frac{\omega_0 L}{R}\right)^2 - 1} = 0 \quad (23)$$

분기용량 C_0 과 유도도 L_0 은 다음과 같다.

$$C_0 = \frac{1.089}{\omega^2 R} \quad (24)$$

$$L_0 = \frac{1}{\omega_0^2 C_0} \quad (25)$$

그림 3에 집중요소들이 있는 무효저항보상E급회로와 그것의 성능을 보여주었다. 이 경우에 분기콘덴샤와 직렬유도도가 있는 회로의 무효저항은 정방향의 경사를 가지는 직렬공진회로의 저항과 유사하며 요구되는 부의 경사는 병렬공진회로에 의하여 얻어진다.

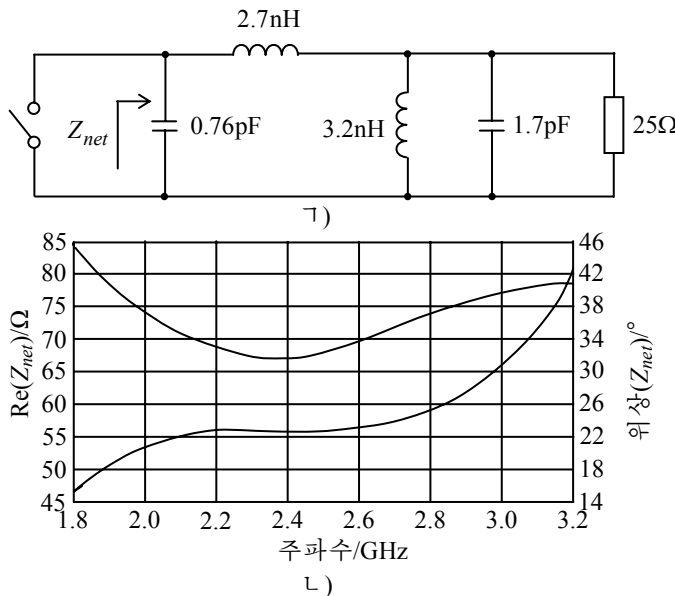


그림 3. 집중요소들이 있는 무효저항보상E급회로(a)와 그것의 성능(b))

분기려파기요소들에 대한 식 (24), (25)와 E급방식에 대한 식 (6) 그리고 식 (4)에 의하여 적당한 회로파라미터에서 2개의 경사들의 크기를 같게 하여 넓은 주파수대역에서 회로부하전저항 Z_{net} 의 총 무효저항과 위상이 일정하도록 한다.

그림 4에 집중요소들과 전송선들이 있는 무효저항보상E급회로(ㄱ))와 그것의 성능(ㄴ))을 보여주었다.

이 경우에 분기려파기는 2.2GHz에서 50Ω 의 특성전저항과 45° 의 전기적길이를 가지는 집중콘덴샤와 유도도를 대신하는 개방/단락회로로막들로 표시된다. 직렬의 유도성저항은 집중유도도로 만들어진다.

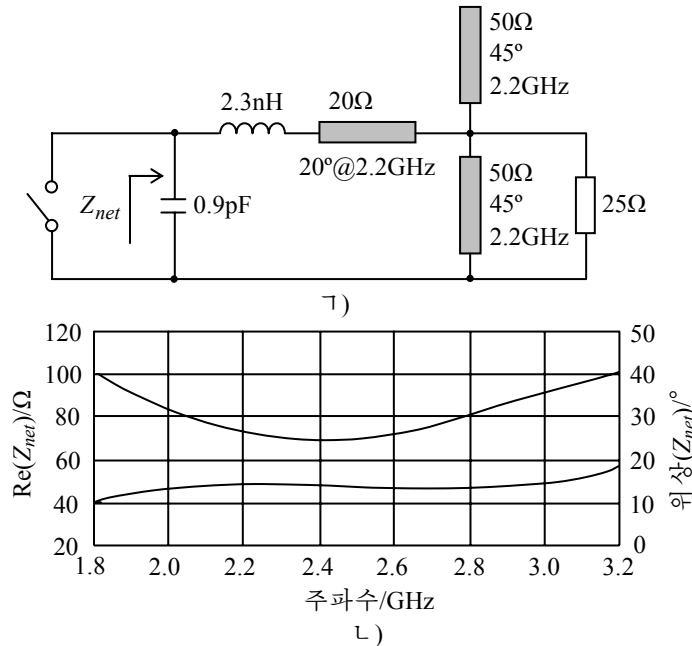


그림 4. 집중요소들과 전송선들이 있는 무효저항보상E급회로(ㄱ))와 그것의 성능(ㄴ))

맺는 말

2.14GHz의 동작주파수에서 전압피크인자를 감소시키기 위하여 2차고조파공진기가 분기려파기에 직렬로 연결될 때 3차고조파에서 단락조건이 이루어지도록 E/F3급방식에 따라 회로부하파라미터들을 재배렬하였다. E급방식의 광대역성능은 집중요소들과 전송선 요소들을 가지고 설계한 회로들에 의하여 증명하였다.

참고 문헌

- [1] A. Mediano, N. O. Sokal; IEEE Trans. Power Electron., 28, 5215, 2013.
- [2] A. Grebennikov; High Freq. Electron., 13, 5, 30, 2014.
- [3] Jeffrey Manni et al.; Elsevier, Optics Communications, 417, 54, 2018.

High-Efficiency Class-E Power Amplifier with Shunt Condenser and Shunt Filter

Ri Chol Hwa, Pak Kwang Chol

Along with explicit derivation of the idealized optimum voltage, current waveforms load network parameters an analysis of a novel single-ended Class-E mode with shunt condenser and shunt filter with their verification by frequency domain simulations with 50% duty ratio is presented.

Keywords: circuit design, efficiency, harmonic balance technique