

발전주파수 확장을 위한 RC와 SC형
Wien-Bridge 발진기 설계

Design of RC and SC type Wien-Bridge Oscillator
for the Frequency Range Improvement

○ 신 규 재 * 김 동 용 **
전북대학교 전기공학과 * **

Shin Kyoo - Jae * Kim Dong - Yong **

Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University * **

ABSTRACT

In this paper, we have proposed the advanced Wien-Bridge oscillator which uses three operational amplifiers to extend the frequency range. The designed oscillator is shown that the frequency range can be more substantially extended than it of Budak and Nay.

Also, to have an advantage for the IC, the designed RC oscillator is realized SC oscillator by the forward Z transform, which has the same frequency characteristics with the designed RC oscillator.

1. 서 론

RC형 Wien-Bridge 발진기의 발전주파수 대역을 확장하기 위하여 Reddy는 2개의 연산증폭기로 구성된 이득증폭단을 제시하였고^[1], 후에 Budak과 Nay는 Reddy의 방법을 개선하여 발전주파수 대역을 0 ~ 20KHz까지 확장하였다^[2].

그러나, 상기의 RC형 발진기는 아직도 발전 대역폭이 협소하고 IC화하는데 많은 문제점을 갖고 있다.

발진기의 주파수대역을 확장함에 있어서 중요한 관점은 주파수가 증가함에 따라 히츨상에 극점을 얼마동안 유지할 수 있는가 이다. 이 문제는 이득증폭단의 이득과 위상이 $3\angle 0^\circ$ 인 회로를 설계함으로써 해결된다.

그러므로, 본 논문에서는 3개의 연산증폭기로 구성된 이득증폭단을 설계하여 Budak과 Nay가 제시한 발진기보다 주파수대역을 10KHz정도 확장하였고, 집적화하는데 유리하도록 RC 발진기를 Forward Z 변환법에 의하여 스위치드-커패시터(Switched-Capacitor:SC) 발진기로 실현하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 상기의 RC 발진기와 주파수 특성이 거의 일치함을 확인하였다.

2. 발전주파수 확장을 위한 이득증폭단 설계

Wien-Bridge 발진기는 그림 1.과 같이 주파수 선택회로 $B_{RC}(S)$ 와 이득증폭단 $G(S)$ 로 나타낼 수 있다.

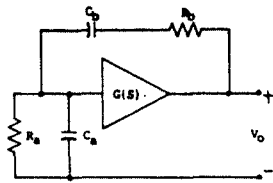


그림 1. RC형 Wien-Bridge 발진기

발진하기 위해서는 이득증폭단 $G(S)$ 가 다음 식을 만족해야 한다.

$$G(S) = 3\angle 0^\circ \quad (1)$$

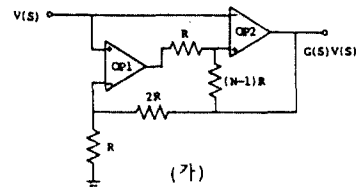
그러나, 이득증폭단 $G(S)$ 를 구성한 연산증폭기의 이득 $A(S)$ 는 실제적인 경우에

$$A(S) = GB/S = 1/S\tau \quad (2)$$

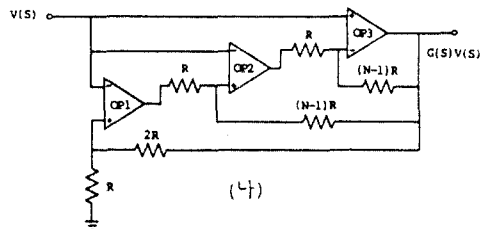
여기서, GB:이득-대역폭

τ :연산증폭기의 시정수

이므로, 식 (1)의 조건을 한정된 주파수에서만 만족하게 되어 발전주파수 대역이 제한된다.



(가)



(나)

그림 2. (가) Reddy(N=3), Budak과 Nay(N=√3)의 이득증폭단
(나) 본 논문에서 설계한 이득증폭단

발전주파수를 확장하기 위하여 Reddy는 그림 2. (가)의 회로 (N=3)를 제시하였으며, Budak과 Nay는 저항구성비 $N=\sqrt{3}$ 으로 하여 발전주파수 대역을 약간 증가시켰다. $N=3, \sqrt{3}$ 일때의 $G(S)$ 와 $\theta(S)$ 를 그림 3.에 나타냈으며, 특성방정식의 근을 주파수 함수로 변환하여 그림 4.에 나타냈다.

그림 3.으로부터 주파수가 증가함에 따라 $G(S)$ 가 증가하고 $\theta(S)$ 가 지상하는 문제가 발생한다. 그러므로 이를 개선하기 위해 그림 2. (나)와 같은 회로를 제시한다. 이 회로의 $G(S)$ 는

$$G(S) = \frac{(S\tau)^2 + S\tau\left(\frac{N-1}{N}\right) + \left(\frac{N-1}{N}\right)^2}{(S\tau)^3 + \left[\left(S\tau\right)^2 + \left(\frac{N-1}{N}\right)S\tau + \frac{(N-1)^2}{3N}\right]} \quad (3)$$

이며, 최적 저항 구성비 N 값은 표 1.로부터 $N=3$ 으로 결정할 수 있다. 이 경우 특성방정식은 다음과 같다.

$$27S^3\tau^3 + S^4(9\tau^2 + 81W_0\tau^3) + S^2(6\tau + 27W_0\tau^2) + S^2(9W_0^2\tau^2 + 4) + 6SW_0^2\tau + 4W_0^2 = 0 \quad (4)$$

식 (3)의 $G(S)$ 와 $\theta(S)$ 는 그림 3.에 나타내었고, 식 (4)에서 구한 근을 주파수함수로 변환하여 그림 4.에 나타냈으며, Budak과 Nay의 발전기보다 주파수 대역이 10KHz정도 확장됨을 알 수 있다.

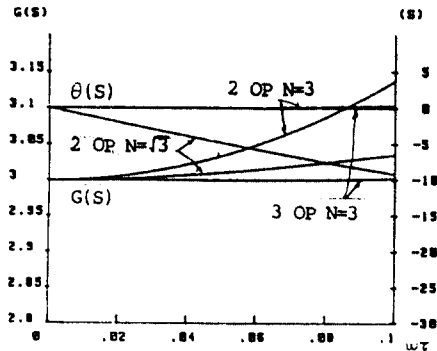


그림 3. 그림 2. (가)와 (나)의 크기와 위상특성비교

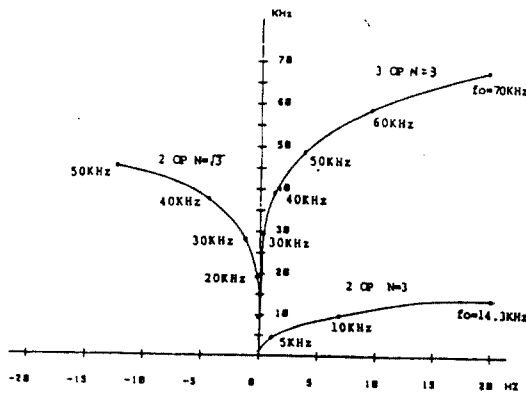


그림 4. 그림 2. (가), (나)를 이용한 발전기의 주파수비교

표 1. 그림 2. (나)회로의 최적 저항비 N 값의 결정

N	$\omega\tau$	0.000	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020
2.9	$G(S)$	3	2.999998	2.999998	3.000000	3.000010	3.000035
	$\theta(S)$	0	-0.0120379	-0.0238231	-0.0355089	-0.0468376	-0.0571641
3	$G(S)$	3	3.0000000	3.0000001	3.0000008	3.0000019	3.0000046
	$\theta(S)$	0	0.0000247	0.0001980	0.0006882	0.0015841	0.0030638
3.1	$G(S)$	3	2.9999980	2.999998	3.0000001	3.0000009	3.0000031
	$\theta(S)$	0	0.0108378	0.0220217	0.0333079	0.0452125	0.0578115
4	$G(S)$	3	2.9999973	2.9999894	2.9999793	2.9999584	2.9999261
	$\theta(S)$	0	0.0764160	0.1529822	0.2297096	0.3069654	0.3846828

3. SC형 발전기 설계

저항 R_{sc} 은 식 (5)과 같이 상호결속된 스위치 S와 커패시터 C로 등가 변환할 수 있다.

$$R_{sc} = T/C \quad (5)$$

SC회로를 설계할 위한 Z 변환법은 a)Forward, b)Backward, c)Bilinear 방법이 있으나, 본 논문에서는 R을 SC회로로 간단하게 변환 설계할 수 있는 Forward Z 변환법을 이용한다. 이 Z 변환식은 다음과 같다.

$$s \rightarrow \frac{z-1}{T} \quad (6)$$

여기서, T:샘플링 주기

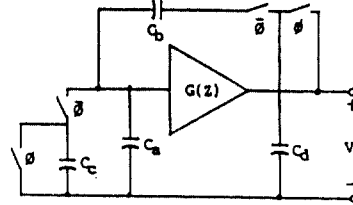


그림 5. SC형 Wien-Bridge 발전기

그림 1.은 Forward Z 변환에 의하여 그림 5.와 같이 SC형 발전기로 설계할 수 있으며, 이 회로내의 C는 식 (5)에 의하여

$$C_a = T/R_n, \quad C_b = T/R_n \quad (7)$$

와 같으며, SC형 주파수 선택회로에서 $C_n = C_b, C_c = C_e$ 이면 $B_{sc}(S)$ 는 식 (8)과 같다.

$$B_{sc}(S) = \frac{W_0 S}{S^2 + 3W_0 S + W_0^2} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } W_0 = \frac{1}{T} \frac{C_m}{C_n}, \quad Q = 1/3$$

식 (8)에 식 (6)을 이용하면

$$B_{sc}(Z) = \frac{T(W_0 Z - 1)}{Z^2 + Z(3W_0 T - 2) + 1 - 3W_0 T + W_0^2 T^2} \quad (9)$$

과 같고 $B_{sc}(Z)$ 와 $\theta_{sc}(Z)$ 를 그림 6.에 제시하였다.

그림 6.의 전파로부터 Budak과 Nay의 RC형 선택회로⁽²⁾와 동일한 결과 얻을 수 있으며, $W = W_0$ 일때

$$B_{sc}(e^{j\omega_0}) = 1/3, \quad \theta_{sc}(e^{j\omega_0}) = 0^\circ \quad (10)$$

임을 알 수 있다.

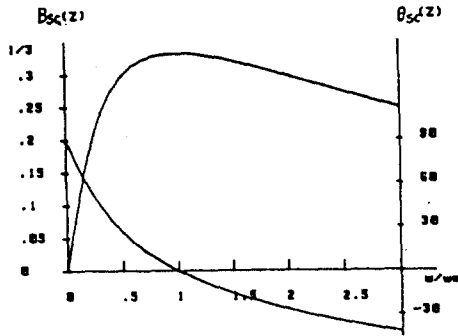


그림 6. SC형 주파수 선택회로의 크기와 위상 특성

3.3 이득중복단 설계

본 논문에서는 설계한 그림 2. (나)의 회로를 Forward Z 변환법을 이용하여 그림 7.과 같이 SC로 구성된 이득중복단 회로를 설계할 수 있다.

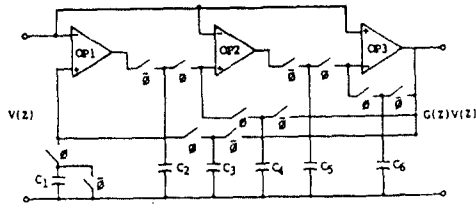


그림 7. 발전주파수 확장을 위한 SC형 이득중복단

이 회로의 $G(Z)$ 는 다음과 같다.

$$G(Z) = \frac{AZ^2 + BZ + C}{DZ^3 + EZ^2 + FZ + G}$$

$$\text{여기서, } A = N^2\tau^2$$

$$B = 7N(T(N-1) - 2(N))$$

$$C = N^2\tau(T-N) + T(T(N-1)^2 + N\tau)$$

$$D = 3N^2\tau^2$$

$$E = 3N\tau^2(-3N\tau + 1)$$

$$F = 3\tau(3N^2\tau^2 - 2NT + \tau^2(N-1))$$

$$G = 3(-N^2\tau^2 + 3NT\tau - T^2N + T^2) + T^3(N-1)^2$$

$$N : \text{저해기턴스 구성비}$$

$$\tau = 10^{-6}/2\pi$$

또한, 그림 7.에서 최적 Capacitance비 N 를 구하기 위하여 N 의 변화에 대한 $G(Z)$ 와 $\theta(Z)$ 를 ωT 의 함수로 표 2.에 제시하였으며, 이 표로부터 $N=3$ 인때 식 (10)의 조건에 최적 상태를 알 수 있다.

표 2. 그림 7.회로의 최적 커패시턴스비 N 값의 결정

N	ωT	0.000	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020
2.9	$G(Z)$	2.9999999	3.0000000	3.0000001	3.0000007	3.0000022	3.0000052
	$\theta(Z)$	0	-0.0120370	-0.0239231	-0.0355069	-0.0466378	-0.0571630
3	$G(Z)$	2.9999999	3.0000000	3.0000001	3.0000005	3.0000018	3.0000045
	$\theta(Z)$	0	0.0000247	0.0001080	0.0002683	0.0005841	0.0030942
3.1	$G(Z)$	2.9999999	2.9999999	2.9999996	2.9999994	2.9999967	3.0000010
	$\theta(Z)$	0	0.0109378	0.0220217	0.0333979	0.0452125	0.0576117
4	$G(Z)$	2.9999999	2.9999968	2.9999873	2.9999717	2.9999502	2.9999231
	$\theta(Z)$	0	0.0764160	0.1529821	0.2297682	0.3069845	0.3846812

식 (11)의 $G(Z)$ 와 $\theta(Z)$ 는 그림 8.에 제시했으며, 이 결과로부터 RC의 결과 (그림 3.)와 거의 일치함을 알 수 있다.

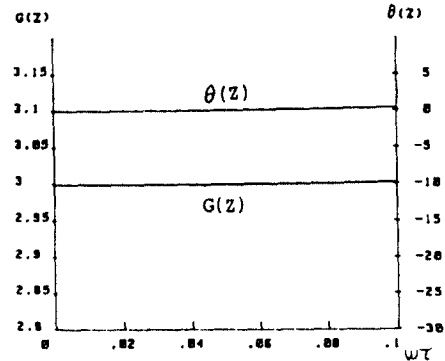
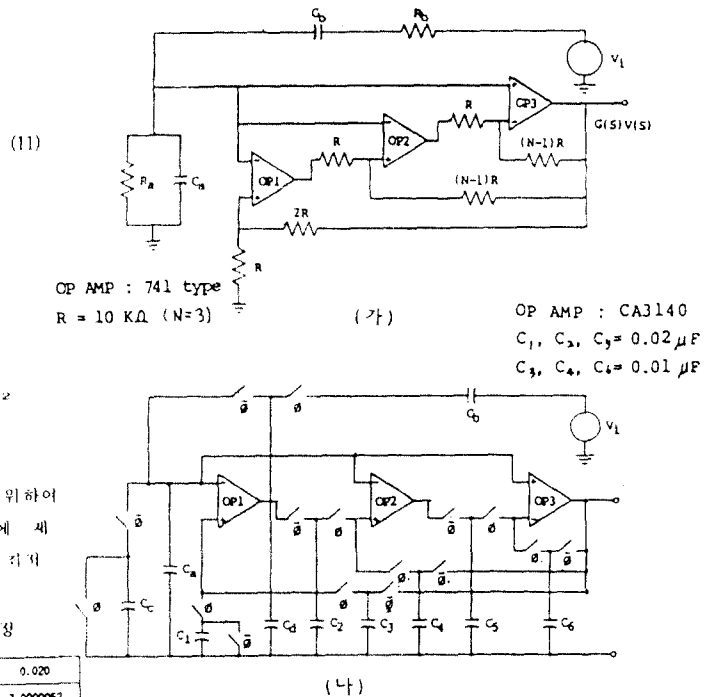


그림 8. 그림 7.의 크기와 위상특성

4. 컴퓨터 시뮬레이션과 비교 및 교환

4.1 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 설계한 RC형과 SC형 발전기의 루프이득 LG를 비교하기 위하여 그림 9.의 발전기를 구성하였다.



OP AMP : 741 type
R = 10 KΩ (N=3)

(가)

OP AMP : CA3140
C₁, C₂, C₃ = 0.02 μF
C₄, C₅, C₆ = 0.01 μF

(나)

그림 9. 루프이득 해석을 위한 발전기

(가) RC형, (나) SC형

그림 9. (나)의 $B_{RC}(S)$ 와 θ_{SC} 는 식 (9)와 식 (11)로부터 구하여 그림 10.과 표 3.에서 비교하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 발진기의 주파수대역을 확장하기 위하여 3개의 연산증폭기로 구성된 이득증폭단을 설계한 결과, 발진주파수 대역이 Budak과 Nay가 제시한 발진기보다 10KHz정도 확장되었음을 확인하였다. 또한, 집적화하는데 있어서 발생하는 RC형 발진기의 문제를 해결하기 위해 Forward Z 변환법에 의하여 SC회로로 구성된 발진기를 설계하였으며, 시뮬레이션한 결과가 RC형 발진기의 주파수 특성과 거의 일치함을 확인하였다.

이 SC형 발진기는 근래에 현저하게 발달한 MOS치리의 기술을 이용하여 연산증폭기를 포함한 SC회로들 양질의 상태로 집적화하는 것이 가능하다. 또한, 발진 주파수 선택은 정확한 capacitance의 비에 의하여 고정밀도의 발진기로 실현할 수 있으므로 소전력을 요구하는 통신, 제어기기 및 전력계통에 유익하게 사용될 것으로 사료된다.

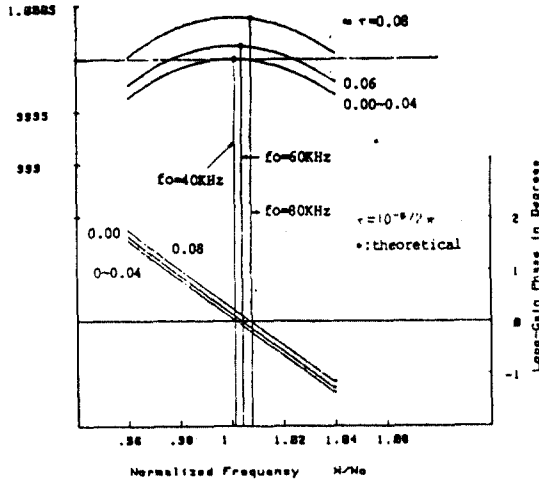


그림 10. 그림 9. (가), (나)의 루프이득의 크기와 위상특성

표 3. 그림 9. (가), (나)의 루프이득의 크기와 위상특성

ω/ω_0	τ	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
0.20	$B_{sc-G}(S)$	0.9996206	0.9996313	0.9996555	0.9997868	1.0000444	1.0005428
	$\theta(S)$	1.5593333	1.5824273	1.5840854	1.6428780	1.7573584	1.9482743
0.58	$B_{sc-G}(Z)$	0.9996328	0.9996343	0.9996571	0.9997557	1.0000211	1.0005813
	$\theta(Z)$	1.5593606	1.5824548	1.5841200	1.6429592	1.7578514	1.9470213
1.00	$B_{sc-G}(S)$	0.9999093	0.9999109	0.9999352	1.0000405	1.0003241	1.0009227
	$\theta(S)$	0.7710924	0.7747863	0.7964445	0.8552351	0.9697474	1.1586334
1.00	$B_{sc-G}(Z)$	0.9999125	0.9999140	0.9999368	1.0000354	1.0003009	1.0008613
	$\theta(Z)$	0.7717050	0.7747692	0.7964644	0.8553036	0.9699958	1.1582657
1.02	$B_{sc-G}(S)$	1	1.0000018	1.0000259	1.0001312	1.0004148	1.0010135
	$\theta(S)$	0	0.9039939	0.0247520	0.0835427	0.1980550	0.3869410
1.02	$B_{sc-G}(Z)$	1.0000033	1.0000048	1.0000278	1.0001282	1.0003917	1.0009521
	$\theta(Z)$	-3.1577538	0.0030628	0.0247273	0.0835673	0.1982592	0.3878291
1.04	$B_{sc-G}(S)$	0.9999128	0.9999144	0.9999287	1.0000440	1.0003277	1.0009282
	$\theta(S)$	-0.7564101	-0.7333181	-0.7318580	-0.6728674	-0.5583550	-0.3694891
1.04	$B_{sc-G}(Z)$	0.9999162	0.9999177	0.9999405	1.0000391	1.0003048	1.0008650
	$\theta(Z)$	-0.7564097	-0.7333155	-0.7318503	-0.6728111	-0.5581189	-0.3687490
1.04	$B_{sc-G}(S)$	0.9998581	0.9998597	0.9998840	0.9997893	1.0000729	1.0006713
	$\theta(S)$	-1.4981634	-1.4950694	-1.4734113	-1.4148207	-1.3001083	-1.1112224
1.04	$B_{sc-G}(Z)$	0.9998618	0.9998631	0.9998858	0.9997844	1.0000499	1.0006101
	$\theta(Z)$	-1.4981617	-1.4950875	-1.4734222	-1.4145830	-1.2998909	-1.1105210

4.2 비교 및 고찰

본 논문에서 제시한 이득증폭단 [그림 2.(나)] 회로는 그림 3.로 부터 Budak과 Nay가 제시한 회로보다 식 (1)의 조건에 매우 접근함을 알 수 있으며, 이 회로를 이용할 경우 주파수 대역이 Budak과 Nay의 발진기보다 10KHz정도가 확장되었다 [그림 4.].

이 증폭단을 이용하여 SC로 구성된 증폭단 [그림 7.]을 구성한 결과가 그림 8.에서 RC 증폭단의 주파수 특성 [그림 3.]과 일치함을 알 수 있었으며, 또한 그림 10.과 표 3.에서 루프이득을 비교한 결과 거의 동일한 주파수 특성을 얻었다.

참고문헌

1. W.A.Reddy, Operational-Amplifier Circuits with Phase Shift and Their Application to High-Q Active RC Oscillator, IEEE Trans., Vol. CAS-23, pp.384-389, June, 1976.
2. A.Budak and K.Nay, Operational Amplifier Circuits for the Wien-Bridge Oscillator, IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS-28, pp.930-934, Sep., 1981.
3. Brian L. Stevens & Richard P.Manning, Improvements in the Theory and Design of RC Oscillators, IEEE Trans., Vol. CT-18, No.6, November 1971.
4. Phillip E.Allen, Switched Capacitor Circuits, vnr Van Nostrand Reinhold Co. 1984.
5. E.A.Vittoz, Micropower Switched Capacitor IEEE J. of Solid-state Circuits, Vol. SC-14, No.3, June 1979, pp.622-624.
6. Jiri VLACH, Hand Analysis of Switched-Capacitor Networks, IEEE CAS MAG, November 1986.
7. Carl F.Kurth & George S. Moschytz, Nodal Analysis of Switched-Capacitor Network, CAS-26, No.2, February
8. Gabor C. Temes & H.J.Orchard, Switched-Capacitor Filter Design Using the Bilinear Z-Transform, IEEE Trans., Vol. CAS-25, No.12, December 1978