

신호분배기의 광대역 설계에 관한 연구

김동일¹⁾, 류현욱²⁾, 정세모²⁾

A Study on Broad-Band Design of the Power Divider

D. I. Kim , H. W. Ryu , S. M. Chung

Abstract

This paper has dealt with the design and analysis methods of the frequency characteristics for the power dividers which are extensively used in CATV and DBS systems. Therefore, the lumped-element circuits have been implemented based on the Wilkinson power divider and the characteristics of the circuits approximated to ideal transformer examined. Then the frequency characteristics are analysed by using even-odd-mode method. Furthermore, in order to improve the characteristics, the optimum design method by adding compensating circuit has been proposed and it has been shown that the characteristics are improved remarkably.

1. 서 론

1949년 미국에서 난시청 지역을 해결하기 위해 시작한 CATV는 시시각각으로 변하는 정보의 신속한 전달과 공유라는 측면에서 정보시대라 불리는 현대사회의 요구에 따라 선진국에서 급진적으로 발전해 왔으며, 방송위성을 이용하는 DBS의 확대와 HDTV의 등장 등으로 각종 정보전송의 광대역화 및 고성능화는 반드시 해결되어야 할 중요한 과제중의 하나로 부각되고 있다. 또한 CATV는 기존 방송의 특성인 영상문자정보의 대량전달이 가능하고 전기통신의 장점인 양자간 정보소통이 가능한 쌍방향 정보 전송을 동시에 만족할 뿐만 아니라 최근에 인터넷을 통한 부가서비스가 첨가되어 정보화사회를 추구하는 현대사회에 미치는 영향과 역할은 날이 갈수록 그 중요성이 더해가고 있다[1].

CATV 또는 DBS시스템의 채널수를 증가시키고, 또한 화질이 좋은 화면 정보를 전송하기 위한 중요한 핵심소자로는 신호분배기(Power divider)가 있다. 만약, 이 소자의 성능이 불량할 경우에 Ghost현상, 화면의 찌그러짐, 전송정보의 손실 등을 가져올 수 있다. 다시 말해 신호분배기의 최적·광대역 설계가 이루어져야만 CATV시스템의 본래의 목표를 달성할 수 있는 것이다. 지금까지 사용되어 오고 있는 신호분배기는 경험적·실험적으로 설계·제작되어 왔을 뿐, 이들의 최적·광대역 설계법에 관한 이론적인 연구는 국내외를 통해서 매우 저조한 실정이었다. 종래에는 5~600 MHz의 주파수대역을 사용하였지만 DBS의 확대에 인하여 주파수대역이 1990년대 중반까지는 5~1350 MHz, 다채널 영상서비스의 확대 및 부가 정보통신기능의 확대에 따라 최근에는 사용 주파수대역폭이 CATV 및 DBS를 포함하여 5~2150 MHz까지, 유럽의 일부지역에서는 5~2450 MHz대역까지 사용을 하고 있으며, 향후 이 주파수 대역은 세계적인 추세로 나아갈 전망이다. 반면, 국내업체의 신호분배기 제작기술은 5~800 MHz 정도 밖에 되지 않는다. 이 또한 경험적·실험적인 방법으로 제작하여 많은 인력과 시간이 소요되는 단점을 지니고 있다.

1) 한국해양대학교 전자공학과

2) 한국해양대학교 해사수송과학부

따라서, 본 연구에서는 변성기형 신호분배기의 입력단에 보상회로를 추가하여 우·기 모드 여진법에 의한 해석법을 제안하여, 사용 주파수대역폭을 5~2450 MHz 대역에서 삽입손실 4.2 dB 이하, 반사손실, 단자간 결합손실 25 dB 이상을 만족하는 광대역 CATV 및 DBS시스템용 신호분배기를 이론 및 실험을 통하여 최적설계법을 제안함으로써, 정보화 시대의 요구에 부응하고자 한다.

2 신호분배기 설계 이론

2.1 변성기형 윌킨슨 신호분배기

1960년경 윌킨슨에 의해 제안된 n-way hybrid power divider는 속이 빈 내부도체가 $\lambda/4$ 길이의 n 개 spline으로 쪼개어진 동축선으로 구성되어 있으며, 단락판은 입력단의 spline으로 연결되어 있고 저항은 출력단의 각 spline과 공동접합부 간에 방사적인 형태로 연결되어 있다. 이 때, 신호가 입력단으로 급전되면 각 spline의 대칭성에 의해 n개의 동위상, 동진폭의 신호로 나누어지게 된다.

그러나, 윌킨슨이 제안한 신호분배기는 spline의 길이를 $\lambda/4$ 로 제작하였기 때문에 고주파에서는 대단히 실용적이며 양호한 특성을 나타내지만, 저주파에서는 그 물리적 크기가 파장에 비례하여 커지기 때문에 사용상 어려움이 있다.

따라서, 윌킨슨이 제안한 신호분배기를 ferrite toroidal core를 사용한 집중정수형 회로에 대해서는 설계법이 확립되어 있지 않기 때문에 본 절에서는 그 이론적 설계법을 검토하였다. 그림 1은 윌킨슨이 제안한 분배회로를 2-분배기로 사용할 경우의 회로도이다.

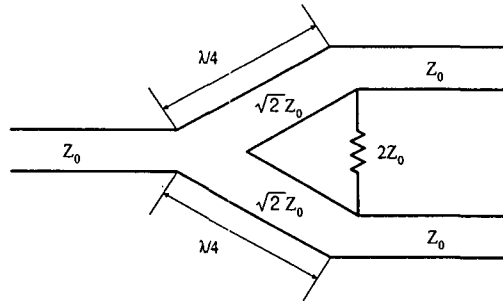


그림 1. Wilkinson power divider

윌킨슨에 의해 제안된 신호분배기는 toroidal core를 사용한 변성기를 써서 그림 2와 같이 대체할 수 있다. 회로중의 변성기는 5~500 MHz의 주파수대에서 선간용량을 무시하고 이상변성기로 근사할 수 있으므로[2] 그림 2의 분배회로에서 전압·전류의 관계식은 다음 식(1)과 같다.

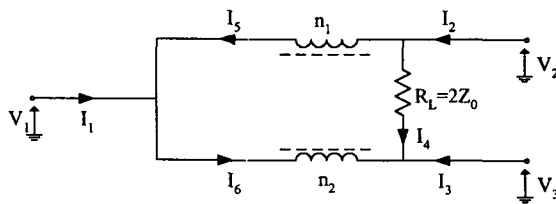


그림 2. 변성기형 Wilkinson power divider

$$\begin{aligned}
V_1 - V_2 &= r(V_1 - V_3) \\
I_6 &= rI_5 \\
I_1 &= -I_5 + I_6 \\
I_4 &= -I_3 - I_6 \\
I_4 &= I_2 - I_5 \\
I_1 &= -I_3 - I_2
\end{aligned} \tag{1}$$

여기서, r 은 신호분배기를 구성하는 변성기의 권선비를 나타내며, $r = n_1/n_2$ 로 놓았다.

식(1)을 이용해 산란행렬의 각 요소를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
S_{11} &= \frac{-R(r-1)^2 + 2rR_L}{3R(r-1)^2 + 2R_L(r^2 - r + 1)} \\
S_{22} &= \frac{-R(r-1)^2 + 2rR_L(r-1)}{3R(r-1)^2 + 2R_L(r^2 - r + 1)} \\
S_{33} &= \frac{-R(r-1)^2 - 2R_L(r-1)}{3R(r-1)^2 + 2R_L(r^2 - r + 1)} \\
S_{12} = S_{21} &= \pm \frac{2[R(r-1)^2 - R_L(r-1)]}{3R(r-1)^2 + 2R_L(r^2 - r + 1)} \\
S_{13} = S_{31} &= \pm \frac{2[R(r-1)^2 + r(r-1)R_L]}{3R(r-1)^2 + 2R_L(r^2 - r + 1)} \\
S_{23} = S_{32} &= \pm \frac{2[(r-1)^2 R + rR_L]}{3R(r-1)^2 + 2R_L(r^2 - r + 1)}
\end{aligned} \tag{2}$$

위 식에서, $R_L = 2R$ 이고, 권선비 $r=1$ 과 $r=-1$ 인 두 경우를 생각할 수 있다.

여기서 권선비의 두가지 조건 모두를 살펴보면, $R_L = 2R$, $r=1$ 일 때, $S_{11} = 1$, $S_{22} = S_{33} = 0$, $S_{12} = S_{13} = 0$, $S_{23} = 1$ 이 되어 trivial circuit이 되어 버리며, $R_L = 2R$, $r=-1$ 일 때, $S_{11} = 1/3$, $S_{12} = S_{13} = 2/3$, $S_{22} = S_{33} = S_{23} = 1/6$ 이 되어 분배기로 동작함을 알 수 있다.

그러나, S_{22} , S_{33} 에 비해 S_{11} 의 특성이 현저하게 떨어지고 있으므로 port 1에서의 반사량을 줄여 정합도를 높여야 된다. 이를 해결하는 방법으로 보조 변성기를 부가해 정합도를 높이는 방법에 관해서 검토한다[3].

2.2 입력단이 보상된 Wilkinson형 신호분배기

그림 2에 나타난 원형의 Wilkinson형 신호분배기의 특성을 해석한 결과 정합도 및 아이슬레이션에 문제가 있음을 알았다. 따라서, 이를 보완하기 위하여 입력단에 보조회로를 부가하여 보상하면 그림 3과 같은 윌킨슨형 신호분배기가 된다.

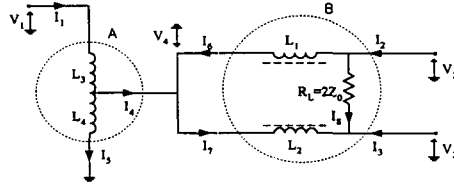


그림 1. 보상된 Wilkinson형 신호분배회로

분배회로를 구성하는 변성기가 이상적인 변성기라고 가정했을 때, 식(2)에서와 같이 산란행렬의 각 요소를 구하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{(r_1-1)^2(r_2^2-2r_2-1)R+(r_1^2+1)(r_2-1)^2R_L-(r_1-1)^2R_L}{D} \\
 S_{22} &= \frac{-(r_1-1)^2(r_2^2-2r_2+1)R+(1-r_1^2)R_L+(r_1^2-1)(r_2-1)^2R_L}{D} \\
 S_{33} &= \frac{-(r_1-1)^2(r_2^2-2r_2+1)R+(r_1-1)^2R_L-(r_1^2-1)(r_2-1)^2R_L}{D} \\
 S_{12} = S_{21} &= \pm \frac{2[(r_2-1)(r_1-1)^2R-(r_1-1)(r_2-1)R_L]}{D} \\
 S_{13} = S_{31} &= \pm \frac{2[(r_2-1)(r_1-1)^2R+r_1(r_1-1)(r_2-1)R_L]}{D} \\
 S_{23} = S_{32} &= \pm \frac{2[(r_1-1)^2R+r_1(r_2-1)^2R_L]}{D}
 \end{aligned} \tag{3}$$

단, $D = (r_1-1)^2(r_2^2-2r_2+3)R+(r_1^2+1)(r_2-1)^2R_L+(r_1-1)^2R_L$

$$r_1 = n_1/n_2, \quad r_2 = n_3/n_4$$

이며, R 은 external line의 특성 임피던스(75Ω)이다.

식(3)에서 완전 아이슬레이션 조건은 $S_{23}=0$ 이므로 규격화된 최적저항치 \tilde{R}_L 은

$$\tilde{R}_L = -\frac{(r_1-1)^2}{r_1(r_2-1)^2} \tag{4}$$

$$\text{단, } \tilde{R}_L = R_L/R$$

이 되며, 식(4)를 완전정합의 조건인 $S_{11}=S_{22}=S_{33}=0$ 에 대입한 결과 r_1 및 r_2 의 최적값은 다음과 같이 정해진다.

$$r_1 = -1, \quad r_2 = 1 \pm \sqrt{2} \tag{5}$$

이들 값을 식(4)에 대입하면 R_L 의 최적치는 150Ω이 된다.

3. Even-Odd법에 의한 해석

3.1 원형의 Wilkinson power divider의 해석

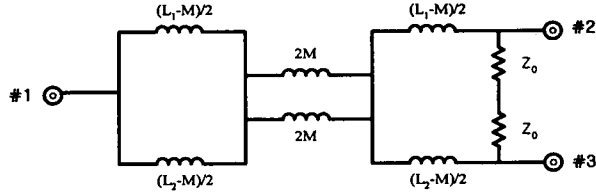


그림 4. 그림 2의 등가회로

(1) Even-mode 여진

그림 4는 그림 2의 등가회로이며, 그림 5는 Even-mode 여진시의 등가회로를 나타낸다. 그림 5를 이용하여 입력 임피던스 및 반사계수는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다..

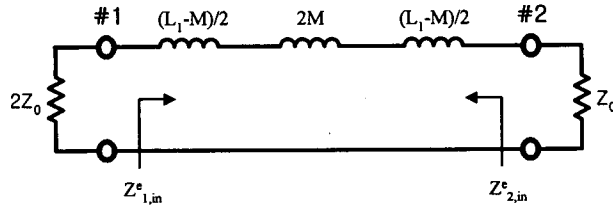


그림 5. Even mode 여진시의 입력 임피던스

$$Z_{1,in}^e = Z_0 + j\omega\left(\frac{L_1-M}{2}\right) + j\omega 2M + j\omega\left(\frac{L_1-M}{2}\right) \quad (6)$$

$$\Gamma_1^e = \frac{Z_{1,in}^e - 2Z_0}{Z_{1,in}^e + 2Z_0} \quad (7)$$

$$Z_{2,in}^e = 2Z_0 + j\omega\left(\frac{L_1-M}{2}\right) + j\omega 2M + j\omega\left(\frac{L_1-M}{2}\right) \quad (8)$$

$$\Gamma_2^e = \frac{Z_{2,in}^e - Z_0}{Z_{2,in}^e + Z_0} \quad (9)$$

(2) Odd-mode 여진

그림 6은 Odd-mode 여진시의 등가회로를 나타내며, 입력 임피던스 및 반사계수는 각각 다음과 같다.

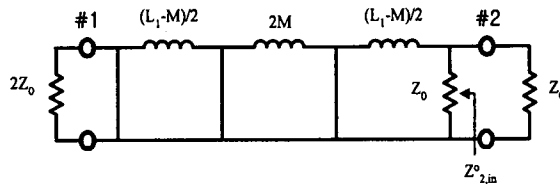


그림 6. Odd mode 여진시의 입력 임피던스

$$Z_{2,in}^o = \frac{j\omega[(L_1 - M)/2] - Z_0}{j\omega[(L_1 - M)/2] + Z_0} \quad (10)$$

$$\Gamma_2^o = \frac{Z_{2,in}^e - Z_0}{Z_{2,in}^e + Z_0} \quad (11)$$

위의 반사계수를 이용해 산란파라미터를 구하면 다음과 같다.

$$S_{11} = \Gamma_1^e \quad (12)$$

$$S_{22} = \frac{\Gamma_2^e + \Gamma_2^o}{2} \quad (13)$$

$$S_{23} = \frac{\Gamma_2^e - \Gamma_2^o}{2} \quad (14)$$

$$S_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - (\Gamma_1^e)^2} \quad (15)$$

3.2 입력단 보상회로를 부가한 경우의 해석

그림 7은 그림 3에 나타난 보상된 Wilkinson형 신호분배회로의 등가회로이다.

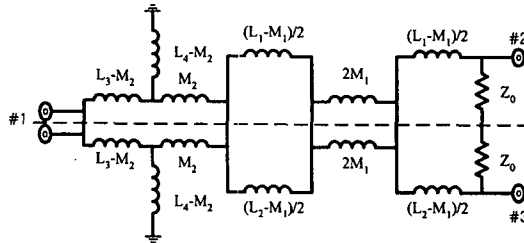


그림 7. 그림 3의 등가회로

(1) Even-mode 여진

그림 8은 그림 7에 나타난 회로의 Even-mode 여진시의 등가회로를 나타내며, 입력 임피던스 및 반사계수는 각각 다음과 같다.

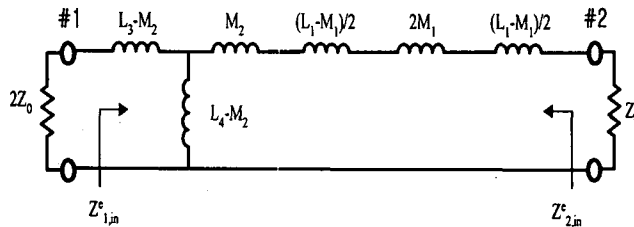


그림 8. Even mode 여진시의 입력 임피던스

$$Z_{1,in}^e = j\omega(L_3 - M_2) + \left[j\omega\left(\frac{L_1 - M_1}{2}\right) + 2j\omega M_1 + j\omega\left(\frac{L_1 - M_1}{2}\right) + j\omega M_2 + Z_0 \right] // j\omega(L_4 - M_2) \quad (16)$$

$$\Gamma_1^e = \frac{Z_{1,in}^e - 2Z_0}{Z_{1,in}^e + 2Z_0} \quad (17)$$

$$Z_{2,in}^e = j\omega M_2 + j\omega\left(\frac{L_1 - M_1}{2}\right) + 2j\omega M_1 + j\omega\left(\frac{L_1 - M_1}{2}\right) + [j\omega(L_3 - M_2) + 2Z_0] // j\omega(L_4 - M_2) \quad (18)$$

$$\Gamma_2^e = \frac{Z_{2,in}^e - Z_0}{Z_{2,in}^e + Z_0} \quad (19)$$

(2) Odd-mode 여진

그림 9는 Odd-mode 여진시의 등가회로를 나타내며, 입력 임피던스, 반사계수는 각각 다음과 같다

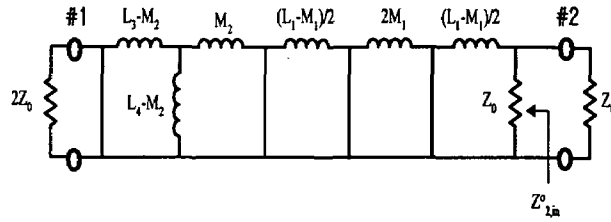


그림 9. Odd mode 여진시의 입력 임피던스

$$Z_{2,in}^o = j\omega\left(\frac{L_1 - M_1}{2}\right) // Z_0 \quad (20)$$

$$\Gamma_2^o = \frac{Z_{2,in}^o - Z_0}{Z_{2,in}^o + Z_0} \quad (21)$$

위의 반사계수를 이용해 산란파라미터를 구하면 다음과 같다.

$$S_{11} = \Gamma_1^e \quad (22)$$

$$S_{22} = \frac{\Gamma_2^e + \Gamma_2^o}{2} \quad (23)$$

$$S_{22} = \frac{\Gamma_2^e - \Gamma_2^o}{2} \quad (24)$$

$$S_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - (\Gamma_1^e)^2} \quad (25)$$

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션하기 위한 각 파라미터는 다음과 같다.

그림 3의 회로를 구성하는 변성기를 이상변성기로 가정하고, 권선수는 각각 $n_1=4.9$, $n_2=4.9$, $n_3=1.9$, $n_4=4.6$ 으로 하였다. 코어에 사용한 페라이트의 투자율 μ 는 식(26)과 같은 주파수분산식 [5]으로 나타낼 수 있다.

$$\mu = 1 + \frac{K}{1 + jf/f_m} \tag{26}$$

단, K 는 초투자율, f_m 은 완화주파수, f 는 사용 주파수이다.

위의 식(12)~(15)를 사용하여 주파수 특성을 컴퓨터 시뮬레이션한 결과는 그림 10과 같다.

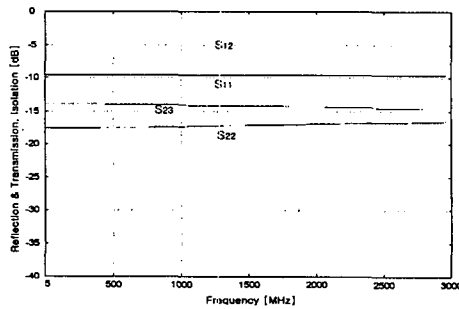


그림 10. 원형의 신호분배기 주파수 특성

그림 10에서 보는 바와 같이 S_{22} , S_{23} 에 비해 S_{11} 의 특성이 불량함을 알 수 있다.

따라서, 향상된 주파수 특성을 얻기 위해 입력단에 보상회로를 부가한 경우에 대해서 식(22)~(25)를 이용하여 시뮬레이션한 결과가 그림 11이다.

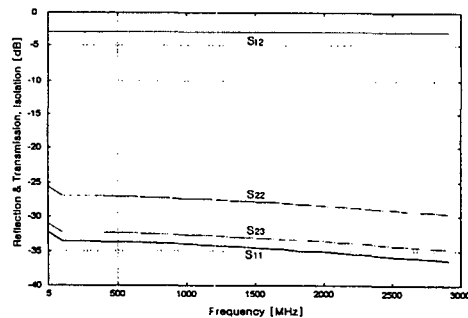


그림 11. 보상된 신호분배기 주파수 특성

그림 11에서 주파수특성을 살펴보면 그림 10에 비해 S_{11} , S_{22} 및 S_{33} 의 특성이 현저하게 향상되었음을 알 수 있다. 즉, 원형의 월킨슨형 신호분배기에 보조변성기를 부가해 높은 정합도를 가지는 회로 설계가 가능함을 보였다.

5. 결 론

원형의 분포정수형 윌킨슨 파워디바이더를 집중정수회로화하여 CATV 및 DBS용 분배기회로를 설계하는 방법을 제시하고, 입력단에 보조 변성기를 부가하여 주파수특성을 향상시키기 위한 설계법을 제안하였다. 앞으로 본 연구에서 제안된 해석법을 토대로 동상형 및 역상형 변성기의 특성 연구와 보상회로로서의 한계능력 등을 평가하고 실험으로 입증하고자 한다.

참고문헌

- [1] 이상근, "한국CATV기기 산업 및 국산화 현황", 방송공학회지, pp. 56-64, 6. 1997.
- [2] Dong Il Kim, et al., "Optimum design of the power dividers with ferrite toroids for CATV and/or MATV systems," IEEE trans. on consumer electronics, vol. CE-29, no. 1, pp.27-38, Feb. 1983.
- [3] 김동일, 김태균, 하도훈, 정세모, "CATV용 신호분배기의 광대역 설계 및 제작에 관한 연구", 한국통신학회 논문지, 제20권, 제12호, pp. 181-187, 1995.
- [4] David M. Pozar, Microwave Engineering, Addison-Wesley, pp. 425-474, 1990.
- [5] Y. Natio, "Formulation of frequency dispersion of permeability," Trans. IECE, vol. 59-c, pp. 297-304, May 1976.