

개선된 보상특성을 갖는 증폭기용 온도보상회로

Thermal Compensation Circuit with Improved Compensation Characteristic for Power Amplifier

정 영 배*

Young-Bae Jung*

Abstract

This paper introduces a thermal compensation circuit with improved compensation characteristic for amplifiers to provide stable output power regardless environmental temperature. The proposed thermal compensation circuit is composed of two branchline couplers having two diodes between them. And, the thermistor whose resistance varies significantly with temperature inversely and a operational amplifiers, so called as OP-amp, control the diodes in the compensations circuit to realize more effective thermal compendation characteristic compared with conventional circuit.

요 약

본 논문에서는 증폭기의 온도에 따른 균일한 출력특성을 구현하기 위한 개선된 보상특성을 갖는 증폭기용 온도보상회로를 제안한다. 제안된 온도보상회로는 직렬로 연결된 2개의 브랜치라인(Branchline) 결합기와 결합기 사이에 위치한 2개의 다이오드로 구성된다. 그리고, 회로의 주변온도에 따라서 저항값이 반비례하는 특성을 갖는 써미스터(Thermistor)와 써미스터를 포함하는 오피앰프(Operational amplifier, OP-Amp.)회로로 다이오드의 동작 특성을 조정함으로써 기존의 온도보상회로에 비하여 보다 효율적인 보상특성을 갖도록 설계하였다.

Key Word: Thermal compensation, amplifiers, operational amplifier

1. 서론

일반적인 전력증폭기는 증폭기를 구성하는 소자의 특성에 따라서 온도(소자의 구동에 따른 내부온도 및 외부온도)에 의한 이득특성의 변화가 발생하게 되는데, 이것은 해당 증폭기의 안정도와 직접적인 관계를 갖는다. 보편적으로 온도에 따른 증폭기의 이득변화는 반비례관계를 갖으며, 이러한 문제를 해결하기

위하여, 다양한 방법이 적용되어 왔다.[1-4] 대표적으로, 기구적인 관점에서 증폭기의 동작온도를 적정 수준으로 유지하기 위하여, 기구의 표면적을 증대시키거나, 기구의 표면에서 강제적인 송풍 등을 일으킴으로써 발생한 온도를 외부로 방출하는 방법이 있다. 또한, 증폭기회로 부근에 해당 증폭기의 출력에 따라 입력신호 전력을 가변할 수 있는 가변감쇄기 등의 제어회로를 삽입함으로써 일률적인 출력특성을 유도하는 방식 등이 사용되어 왔다. 그러나, 기구적인 방법의 경우, 방열기구에 의하여 증폭기의 크기와 무게가 늘어난다는 단점을 가지며, 대부분의 회로적인 방식은 회로구성이 매우 복잡하고, 온도 및 출력을 제어하는 방식에 따라 손실 및 오차가 크다는 이유로 고가의 증폭기에 제한적으로 사용되고 있다.

본 논문에서는 앞서 서술한 기존의 단점을 극복하

* 정회원, 한밭대학교 전자.제어공학과
(Electronics and Control Engineering, Hanbat National University)

※ 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012-0003349)

接受日:2012年 07月 12日, 修正完了日: 2012年 08月 09日
掲載確定日: 2012年 08月 13日

기 위하여, 기구적인 방열을 최소화하고, 구현이 간단한 고성능 보상회로를 제안함으로써 증폭기의 성능을 개선하고자 한다.

II. 온도보상회로 설계 및 동작특성

(그림 1)은 본 논문에서 제안한 증폭기용 온도보상 회로를 도식하고 있다.

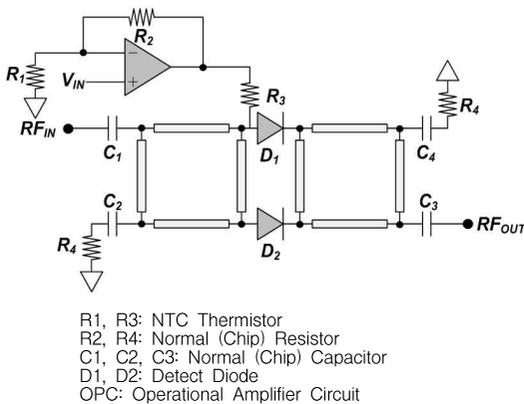


그림 1. 제안된 증폭기용 온도보상회로
Fig. 1. Proposed thermal compensation circuit for amplifiers

제안된 온도보상회로는 두 개의 브랜치라인 결합기(Branchline Coupler)로 구성되어 있으며, 증폭기의 동작온도에 관계없이 균일한 출력을 유지하기 위하여, 두 개의 브랜치라인 결합기 사이에 입력신호의 세기를 조정하기 위한 편 다이오드(D1, D2))를 병렬로 설치하였다. 여기서, 다이오드에 흐르는 전류 제어 회로를 구성하는 오피앰프의 입력부와 출력부에 연결된 저항 R1과 R3는 저항값이 온도에 반비례하는 써미스터 저항이며, R2는 오피앰프의 증폭성능을 결정하는 요소로서 일반적인 저항이 사용된다. 또한, R4는 브랜치라인 결합기 내부에서 반사된 신호전력을 그라운드로 유도하여 상쇄하는 역할을 수행한다. 이를 위하여, 브랜치라인 결합기의 대칭 종단에 위치한 R4는 회로의 특성저항 Z₀와 동일한 값을 갖는다. 또한, 브랜치라인 결합기의 입출력단에 위치한 캐패시터는 다이오드전류 제어회로에 의하여 다이오드에 인가된 전류 I_d에 대한 블로킹 캐패시터(Blocking Capacitor)로 사용된다. 본 구성을 갖는 온도보상회로는 다이오드전류 제어회로를 구성하는 오피앰프의 입력전압 V_{IN}과 오피앰프 외부에 연결된 저항값에 의

해서 아래와 같은 수식을 통하여 출력전압을 나타낸다.

$$V_0 = (1 + \frac{R_2}{R_1}) V_{IN} = K V_{IN}$$

여기서, K는 증폭기의 이득을 결정하는 비례상수이며, 오피앰프의 입력전압 V_{IN}은 R₁, R₂의 비(ratio)에 따라 V₀로 증폭된다. 그리고, 출력전압 V_{OUT}은 오피앰프의 출력단에 위치한 R3를 거쳐 두개의 다이오드에 인가되는 전류 I_d로 환산될 수 있다. 여기서, 온도보상회로가 내장된 알에프증폭기의 동작온도가 상승하는 경우, 다이오드전류 제어회로를 구성하는 써미스터의 저항값이 온도의 상승폭에 반비례하여 감소하게 되며, 상기의 수식에 의하여, 변수 K가 커짐으로써, 결과적으로 오피앰프의 출력전압 V_{out} 역시 커지게 된다. 또한, 출력전압 V_{OUT}은 오피앰프의 출력단에 위치한 써미스터 R₃의 저항값에 의하여 다시 두개의 다이오드에 입력되는 전류 I_d로 보상된다. 이러한 1차 온도보상과정은 써미스터 저항 R₃가 써미스터 저항 R1과 같이, 온도의 상승에 대하여 저항값이 반비례하는 특성을 보임으로써, 오피앰프의 출력전압 V_{OUT}과 써미스터 R₃의 온도특성에 따른 가변적인 저항값에 따라서 다이오드 입력전류 I_d를 2차적으로 제어하는 결과를 보인다. 이러한 전류 I_d의 동작온도에 따른 변화는, 두 개의 브랜치라인 결합기 사이에 위치한 다이오드의 동작저항을 변화시키고, 다이오드의 동작저항에 따라서, 다이오드 전단에 위치한 브랜치라인 결합기의 특성저항 Z₀와 다이오드의 동작저항 사이의 정합도가 변화하게 된다. 또한, 다이오드와 전단의 브랜치라인 결합기 사이의 정합도는 입력되는 알에프 신호전력의 반사율을 결정함으로써, 최종적으로 입력되는 신호전력량을 제어할 수 있는 효과를 나타낸다.

(그림 2)는 제안된 증폭기용 온도보상회로를 포함하는 위상제어용 전력증폭기 모듈의 일 예 구성도이다. 일반적으로 증폭기는 증폭기를 구성하는 소자의 특성에 따라서 소자의 구동에 따른 내부온도 및 외부 온도에 의하여 이득의 증감이 발생되는데, 이것은 해당 증폭기의 안정도와 직접적인 관계를 갖으며, 보편적으로 온도에 따른 증폭기의 이득변화는 반비례관계를 갖는다. 또한, 이러한 온도에 따른 이득의 변화는 상술한 바와 같이 증폭기 소자의 종류에 따라서 그 변화량이 결정된다. 본 증폭기모듈은 신호전력 입력부에 임피던스정합을 위한 아이솔레이터(Isolator)가 위치하며, 평판형 4-bit 위상천이기(MICPS)와 제안된 온도보상회로(TCC)가 순서대로 배치된다. 그리고, 3개의 증폭기소자가 일렬로 위치하며, 첫 번째와 두

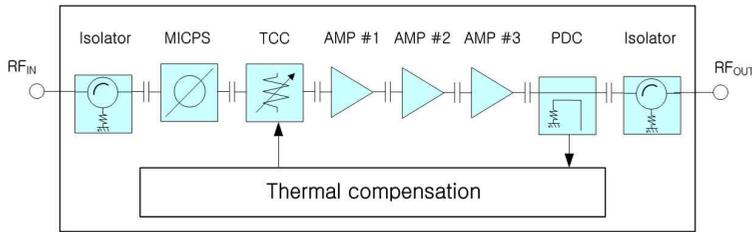


그림 2. 제안된 온도보상회로를 적용한 증폭기모듈의 블록다이어그램
 Fig. 2. Block diagram of the amplifier module including proposed thermal compensation circuit

번째는 구동증폭기이며, 마지막 소자가 최종 모듈의 출력을 결정하는 출력증폭기이다. 이러한 증폭기 소자의 구동에 의한 모듈 내부의 온도변화에 따른 출력 변화는 증폭기 중단에 위치한 전력 검침회로(PDC)를 통하여 확인되며, 온도에 의한 출력신호 변화가 발생하는 경우, 정상적인 출력값을 가질 수 있도록 온도 보상회로에 공급되는 전류량을 제어하게 된다.

본 모듈에서, 증폭기모듈이 동작하는 임의의 시간 t_1 과 t_2 를 고려할 때($t_1 < t_2$), 일반적으로, 시간 t_1 에서 증폭기 내부온도 T_1 은 시간 t_2 로 변함에 따라서 ΔT 만큼의 온도증가증가를 보이게 되며, 이때의 증폭기 내부온도를 T_2 라 할 때, 다음과 같은 식으로 정리될 수 있다.

$$T_2|_{t_2} = T_1|_{t_1} + \Delta T \quad (t_1 < t_2)$$

또한, 온도에 따른 증폭기이득 간의 관계는 상술한 바와 같이 온도상승에 따라 일반적으로 이득이 저하되는 현상을 보이며, 시간 t_1 , t_2 에서의 출력을 P_1 , P_2 라고 할 때 온도에 상승에 따른 출력강하에 의하여 $P_1 < P_2$ 의 관계가 형성되며, 증폭기의 안정된 출력을 위하여, 온도 변화에 따른 출력 강하량(ΔP)을 최소화 하여야 하는 문제가 발생된다. 본 전력증폭기 모듈은, 신호전력의 고효율증폭을 위한 3개의 전력증폭소자, 위상천이기와 제안된 온도보상회로 등으로 구성되어 있으며, 본 모듈에 입력된 신호전력 RF_{IN} 은 각각의 내부소자를 거쳐 최종적인 신호전력 RF_{OUT} 으로 출력된다. 이러한 전력증폭기 모듈의 온도보상은, 전력증폭기 모듈의 동작온도에 따라 변동하는 출력 P_{OUT} 을 직렬로 연결된 3개의 증폭기소자의 중단에 위치한 전력신호 검출기에 의하여 직류전압으로 출력되며, 출력된 직류전압은 온도보상회로에 위치한 오피엠프로 입력됨으로써, 오피엠프의 입력전압 V_{IN} 으로 사용된다. 가령, 전력증폭기회로의 동작온도가 상승하는 경우, 상술한 바와 같이, 일반적인 증폭기의 특성과 같

이, 출력되는 신호전력이 낮아지는 현상이 발생되며, 제안된 온도보상회로를 구성하는 오피엠프 입력 및 출력단에 위치한 써미스터 R_1 , R_3 의 저항값 역시 낮아지게 된다. 이 때, 하강된 전력증폭기의 출력 P_{OUT} 에 의하여, 전력신호검출기의 출력전압 역시 낮게 검출되며, 낮아진 전력신호검출기의 출력전압은, 온도보상회로의 오피엠프에 입력되고, 오피엠프의 입력단에 위치한 써미스터 R_1 과 오피엠프의 입출력 케환에 위치한 저항 R_2 의 변화는 상술한 관계식에 반영된다. 또한, 써미스터 R_1 의 저항값 저하에 의하여, 비례상수 K 가 높아짐으로써 오피엠프의 출력전압 V_{OUT} 역시 높아지는 효과를 보이게 된다. 그리고, 오피엠프의 출력단에 위치한 써미스터 R_3 의 낮아진 저항값에 의하여, 다이오드 전류 I_d 가 높아진다. 따라서, 다이오드의 동작저항과 다이오드 전단에 위치한 브랜치라인 결합기 사이의 정합도가 향상됨으로써, 온도보상회로에 구성된 두 개의 브랜치라인 결합기를 통과하는 입력 신호전력의 양이 증가함으로써, 전력증폭기 모듈의 출력 P_{OUT} 이 증가하는 효과를 보이게 된다.

상술한 내용은 (그림 3)과 같이, 온도보상회로의 성능검토를 위하여 제작한 시험용 증폭기 모듈의 동작특성 검토를 통하여 확인하였다. 본 증폭기모듈은



그림 3. 제작된 온도보상회로 검증용 증폭기 모듈 사진
 Fig. 3. Photo of the fabricated amplifier module to verify the performance of thermal compensation circuit

[표 1] 온도보상회로의 동작변화 및 시험용 증폭기 모듈의 출력보상

[Table 1] Operational scheme of thermal compensation circuit and output power compensation of a amplifier module

구분	Gain	$P_{OUT}@t_1$	R_1	K	V_{out}	R_3	I_d	Γ	$P_{OUT}@t_2$
온도상승	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑
온도하강	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓

의 전기적 다음과 같으며, 동작시간에 따른 증폭기 모듈의 시험결과는 (그림 4)와 같다.

- 동작주파수: 7.9 ~ 8.4GHz (X-band)
- 반사손실: > 14dB
- 선형이득: > 20dB
- 1dB 억압점 출력: 35dBm

상술한 전력증폭기 모듈의 동작온도에 따른 회로동작에 대한 설명은 다음의 [표 1]과 같이 요약될 수 있으며, 표의 내용 중 ' $P_{OUT}@t_1$ '의 경우, 동작온도가 상승하거나 하강한 시점에서의 전력증폭기 모듈의 출력을 나타내며, ' $P_{OUT}@t_2$ '의 경우, 동작온도의 상승 및 하강에 따른 제안된 온도보상회로의 보상과정이 이루어진 시점에서의 전력증폭기 모듈의 출력을 나타낸다.

III. 시험용 증폭기모듈 특성시험 및 분석

앞서 설명한 바와 같이, 제안된 온도보상회로의 동작특성을 검토하기 위하여, (그림 3)에 제시한 시험용 증폭기모듈을 제작하여 시험하였다. 본 시험은 증폭기모듈에 정상적인 전원 및 신호전력을 입력한 상태에서 온도보상회로를 동작시키지 않은 상태와 동작시킨 상태를 비교하는 방식으로 진행하였다. 증폭기 모듈의 동작온도는 모듈의 금속기구물 표면, 특히, 증폭기소자가 위치한 지점에서 측정하였다. 증폭기모듈은 동작시킨 시점으로부터 약 20분 이내에 최고의 온도상태가 되었으며, 최초 실온상태에서 나타난 신호의 출력이 최고온도 시점에서 최고 3dB 정도의 출력강하가 발생하였다. 이때, 제안된 온도보상회로를 동작시켰으며, 이를 통한 증폭기의 출력은 최초 실온상태와 유사한 값으로 돌아옴을 확인하였다.

본 시험의 측정결과는 (그림 4)에 제시되어 있다. 본 결과에서 1번 그래프는 온도보상회로가 동작하지 않았을 시점에서의 출력특성이다. 또한, 2번 그래프는 온도보상회로가 동작됨으로써 정상적인 수준으로 복귀한 결과를 나타낸다. 여기서, 1번 그래프와 겹쳐 측정된 결과는 증폭기의 동작온도가 일정수준 이상이 되었을 때, 약 10분 단위로 측정된 결과로서, 증폭기

모듈의 동작온도가 포화되면, 온도에 의한 출력강하도 유지된다는 사실을 알 수 있다. 온도보상회로를 동작시킨 출력특성과 최초 실온상태에서의 증폭기 출력 간의 오차는 약 0.7dB 발생하였다.

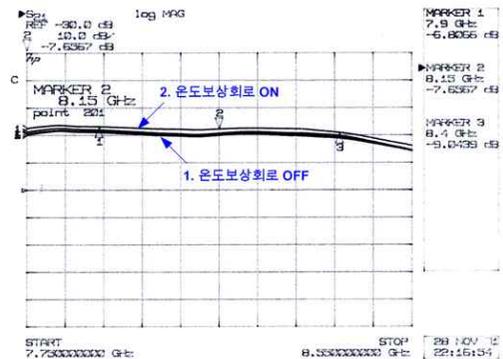


그림 4. 증폭기모듈의 온도에 따른 시험결과
Fig. 4 Test results of amplifier module as temperature variation

IV. 결론

본 논문에서는 간단한 회로를 통하여 효율적으로 증폭기의 온도에 따른 성능저하를 보상할 수 있는 온도보상회로를 제안하였다. 제안된 온도보상회로는 브랜치라인 결합기 사이에 위치한 다이오드의 전류량을 제어함으로써 다이오드의 정합 특성을 변화시키며, 이를 통하여 온도보상회로에 입력되는 신호의 세기를 적정수준으로 조절한다. 그리고, 제안된 회로의 효율성을 검증하기 위한 증폭기모듈을 제작하고 시험함으로써 온도보상회로를 통하여, 최대 3dB 정도의 출력강하를 보상할 수 있음을 확인하였다.

근래, 계속 소형화되고 있는 전력증폭기에 있어서, 동작온도에 의한 성능변화는 해당 전력증폭기의 성능에 지대한 영향을 미친다. 따라서, 제안된 회로는 다양한 증폭기에 적용되어 증폭기의 동작성능을 극대화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] S. Boumaiza, F.M. Ghannouchi, "Thermal memory effects modeling and compensation in RF power amplifiers and predistortion linearizers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, No. 12, pp. 2427 - 2433, 2003
- [2] R. Ishikawa, J. Kimura, K. Honjo, "Analytic parameter determination for thermal memory effect compensation circuit in microwave InGaP/GaAs HBT power amplifiers," *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, pp. 315 - 318, 2011
- [3] L. Blaser, H. Franco, "Push-pull class-AB transformerless power amplifiers," *IEEE Transactions on Audio*, vol. AU-11, no. 1, pp. 6 - 14, 1963
- [4] G. de Graaf, R.F. Wolffenbittel, "Lock-in amplifier techniques for low-frequency modulated sensor applications," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1745 - 1749, 2012
- [5] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*, Prentice Hall, Inc., 1997.

저 자 소 개

정 영 배 (정 회원)



1998년: 광운대학교 전자공학 (공학사)

2011년: KAIST 정보통신공학 (공학 석사)

2009년: KAIST 정보통신공학 (공학 박사)

2001년 2월~2011.02 : 한국전자통신연구원 전자기술연구부

2011년 2월~현재: 국립 한밭대학교 전자.제어공학과 교수
<주관심분야> 이동 및 위성통신용 안테나, 레이다, RF 및 초고주파 부품