

고역률 LED 구동회로의 효율화에 관한 연구

이동원¹, 김병철^{2,a}

¹ 상지과학(주)

² 경남과학기술대학교 전자공학과

A Study on the Efficiency of a High Power Factor LED Driver Circuit

Dong Won Lee¹ and Byungcheul Kim^{2,a}

¹ Sangji Scientific Co., Ltd., Seoul 153-031, Korea

² Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology (GnTECH), Jinju 660-758, Korea

(Received June 4, 2013; Revised June 26, 2013; Accepted July 12, 2013)

Abstract: The rectified voltage supplied to LED lamp is used in load and then the surplus voltage can be produced in LED lighting. In this case, LED lighting is proposed that can recyclable the excess voltage to supply power to the controller.

Keywords: High-efficient power, LED lighting, Charging circuit, Recyclable load current, Voltage phase

1. 서론

발광다이오드 (light emitting diode, LED)는 전류가 흐르면 빛을 방출하는 전광변환 반도체 소자로서 표시기, 백라이트 등에 널리 사용되고 있으며, 기술 발달로 기존의 백열등 및 형광등보다 전광변환 효율이 높아져서 현재는 일반조명으로 그 범위를 넓혀가고 있다 [1-3].

조명장치에서 형광등은 안정기를 사용하여 점등을 하고, LED는 직류로 구동되는 소자이기 때문에 직류 전원공급 장치 (DC SMPS) [4] 또는 정류전압 (즉, AC를 정류한 맥류성 DC 전압)으로 LED 램프를 점등한다 [5].

본 논문은 정류전압으로 구동되는 LED 램프에서

전원장치의 효율을 높이는 방법에 관하여 기술하였다. 구체적으로는, 백열등 대체용과 같은 저전력 LED 램프를 점등하는데 한번 사용한 전류를 전원장치 제어회로를 구동하는데 재사용함으로써 LED 램프의 효율을 높이는 방안을 제시한다.

2. 실험 방법

2.1 기존 LED 조명장치

정류전압구동 LED 램프에는 정류회로만 가지는 LED 램프와, 순시정류전압에 맞추어서 직렬 연결된 LED 개수를 변경하는 LED 램프가 있다. 직렬 연결된 LED 개수를 변경하는 기존의 LED 조명장치를 그림 1에 나타내었다.

상용전원이 투입되어 정류회로로부터 정류전압 (V_{rect})이 공급되기 시작하면 직렬로 연결된 저항 (R9) 및 다이오드 (D9)를 통과한 전류가 직류전원공급 콘

a. Corresponding author: bckim@gnitech.ac.kr

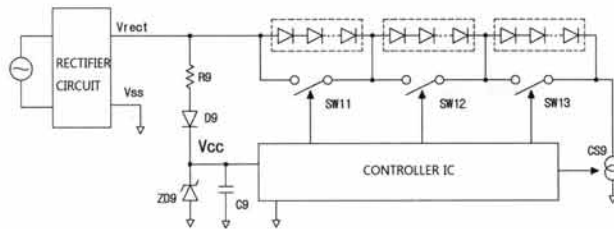


Fig. 1. Conventional LED lighting apparatus.

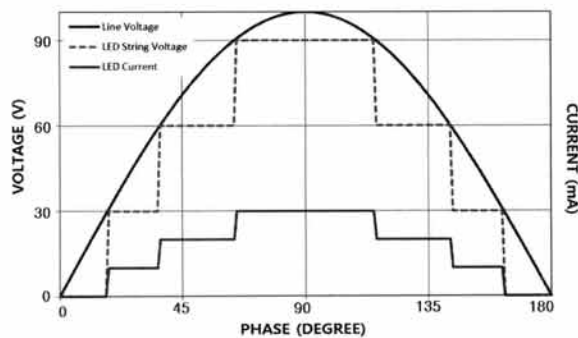


Fig. 2. Voltage and current of LED lamp as a function of phase of input voltage.

덴서 (C9)에 충전되기 시작한다. 그리고 직류전원공급 콘덴서 (C9) 양단전압 (V_{cc})이 제어기가 동작할 수 있는 최소전압 이상이 되면 제어기는 동작을 시작한다.

한편, 직류전원공급 콘덴서 (C9) 양단 전압이 제어기가 동작할 수 있는 최대동작전압에 도달하면, 과전압 방지용 제너다이오드 (ZD9)가 동작하여서 콘덴서 (C9)의 전압상승을 방지한다. 그리고 다이오드 (D9)는 정류전압 (V_{rect})이 콘덴서 (C9)의 양단전압 (V_{cc}) 이하로 내려가면 직류전원공급 콘덴서 (C9)가 저항 (R9)을 통하여 방전되는 것을 방지하는 역할을 한다.

예를 들어 교류전원으로부터 220 V의 상용전압이 공급되고, 제어기의 최대동작전압은 20 V이고, 제어기가 필요한 전류가 1 mA라고 가정하면, 저항 (R9)에서 소비되는 전력은 $200\text{ V} \times 1\text{ mA}$ 가 되어 0.2 W가 된다. 즉, 제어기 구동전원을 생성하는데 0.2 W가 소비된다. 이것은 20 W LED 램프를 구동할 때는 약 1%, 4 W LED 램프를 구동할 때는 5%에 해당하는 전력이다. 따라서 저전력 LED 램프에서 전원효율을

높이기 위한 개선 방안이 필요하다.

그림 1에 나타난 기존의 LED 조명장치에서 순시전압에 의한 스위치 회로의 동작 메커니즘을 설명하기 위하여 LED 양단 전압과 전류를 그림 2에 나타내었다. 그림 1에서 각 LED 블록은 특성이 모두 동일하고, 30 V에서 30 mA의 전류가 흐른다고 가정한다. 또한 순시정류전압 최댓값은 100 V라고 가정하면, 순시전압에 의한 스위치 회로의 동작은 다음과 같다. 먼저, 순시정류전압이 30 V 이하에서는 모든 스위치가 도통 (모든 LED 블록 소등)하고, 전류원 (CS9)은 0 mA (차단)로 설정된다. 두 번째로, 순시정류전압 30 V~60 V에서는 스위치 1개가 차단 (LED 블록 1개가 점등)되고, 전류원 (CS9)은 전류 10 mA가 흐르도록 설정된다. 즉, 1개의 LED 블록에 30 V 이상이 걸리므로 전류가 30 mA 이상이 흐를 수 있지만, 10 mA로 전류를 제한하여 LED 블록 전압을 30 V 이하로 제한하고, 나머지 전압을 전류원 양단에 걸리도록 하여 LED 블록을 보호한다. 세 번째로, 순시정류전압 60 V~90 V에서는 스위치 2개가 차단 (LED 블록 2개가 점등)되고, 전류원 (CS9)은 전류 20 mA가 흐르도록 설정된다. 즉, 2개의 직렬 LED 블록에 60 V 이상이 걸리므로 전류가 30 mA 이상이 흐를 수 있지만 20 mA로 전류를 제한하여 각 LED 블록 전압을 30 V 이하로 제한하고, 나머지 전압을 전류원 양단에 걸리도록 하여 LED 블록을 보호한다. 마지막으로 순시정류전압 90 V 이상에서는 스위치 3개가 차단 (LED 블록 3개가 점등)되고, 전류원 (CS9)은 전류 30 mA가 흐르도록 설정된다. 즉, 3개의 직렬 LED 블록에 90 V 이상이 걸리므로 전류가 30 mA 이상이 흐를 수 있지만 30 mA로 전류를 제한하여 각 LED 블록 전압을 30 V 이하로 제한하고, 나머지 전압을 전류원 양단에 걸리도록 하여 LED 블록을 보호한다.

2.2 제안된 LED 조명장치

저 전력에서도 전원효율이 높은 LED 조명을 실현하기 위하여 LED를 점등하는데 한번 사용한 전류를 전원장치 제어회로를 구동하는데 재사용하도록 하였다. 보다 구체적으로는 부하전류를 제한하는 전류원에서 소모되는 잉여전압을 제어기 전원공급 콘덴서 양단에 걸리도록 하여서 전원공급 콘덴서를 충전하도록 하는 것이다.

그림 3에 나타난 LED 조명장치는 교류전압을 공급하는 교류전원, 교류전원으로부터 공급받은 교류전압

을 직류의 정류전압 (V_{rect})으로 변환하는 정류회로, 정류회로의 출력인 정류전압 (V_{rect})으로 구동되는 부하 (LED 블록1, LED 블록2, LED 블록3), LED 블록 1, 2, 3의 전류를 바이패스 시키는 바이패스 스위치1 (S11) 및 바이패스 스위치2 (S12)가 병렬로 배치된 스위치 블록, 부하의 전류를 제한하는 전류원 (CS1), 그림 3에 표시되어 있지 않지만, 스위치 블록 및 전류원을 제어하는 제어기로 구성되어 있다. 그리고 제어기에 직류전원을 공급하는 전원공급 콘덴서 (C1) 및 전원공급 콘덴서 (C1)를 충전하는 시동회로 (startup circuit)로 구성되어 있다. 시동회로는 저항 (R1), 전원측 다이오드 (D1), 전원측 스위치 (SW1) 및 과전압 방지용 제너다이오드 (ZD1)로 구성된다. 또한, 부하전류를 재활용하여 전원공급 콘덴서 (C1)를 충전하는 부하전류 재활용 충전회로 (recyclable charging circuit)는 부하측 스위치 (SW3) 및 부하측 다이오드 (D3)로 구성된다.

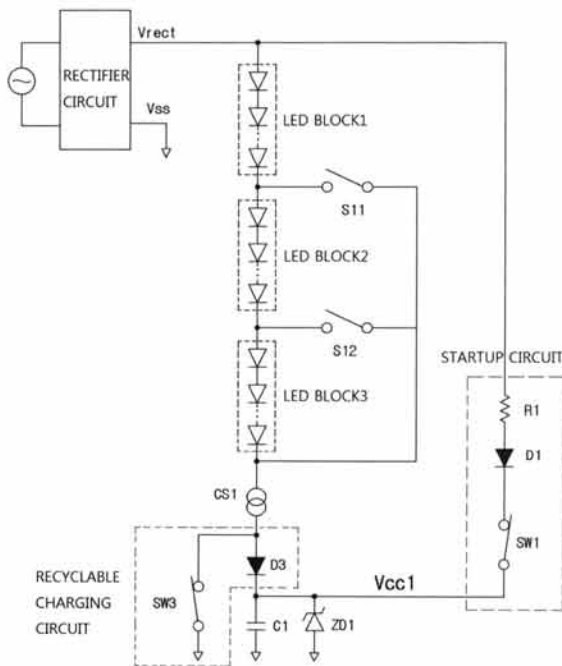


Fig. 3. High efficiency powered LED lighting apparatus.

시동회로 및 재활용 충전회로의 구체적인 예를 살펴본다. 먼저, 시동회로는 전원공급 콘덴서(C1)의 전압이 8 V 이하로 낮아지면 충전이 시작되고, 10 V 이상이 되면 충전이 종료되도록 히스테리시스를 가지고 스위치(SW1)를 제어한다. 재활용 충전회로는 부

하측 스위치 (SW3)가 도통되어 전원공급 콘덴서 (C1)를 충전하지 않는 경우는, 전류원 (CS1) 양단 전압이 콘덴서 (C1)의 전압과 부하측 다이오드 (D3) 전압의 합보다 크면 스위치 (SW3)를 차단하여 콘덴서 (C1)를 충전하도록 한다. 재활용 충전회로는 부하측 스위치 (SW3)가 차단되어 전원공급 콘덴서 (C1)를 충전하는 경우는, 전류원 (CS1) 양단 전압이 포화전압 이하로 낮아지면 스위치 (SW3)를 도통하여 콘덴서 (C1)를 충전하지 못하도록 한다. 이때, 스위치 (SW3)는 히스테리시스를 가지고 작동한다. 또한, 직렬 연결된 LED 블록 개수를 변경하는 스위치 회로가 동작하여 직렬 LED 블록 개수가 변경되면 부하측 스위치 (SW3)는 항상 도통되도록 하여서 전원공급 콘덴서 (C1)를 충전하지 못하도록 한다. 그리고 전원공급 콘덴서 (C1)의 전압이 일정전압 이상 (예로 30 V)이 되는 경우도 스위치 (SW3)를 도통하여 전원공급 콘덴서 (C1)를 충전하지 못하도록 한다.

3. 결과 및 고찰

그림 3에는 지면관계상 LED 블록이 3개, 스위치는 2개로 도시되었으나, 실제 실험에서는 LED 블록 11개, 스위치 10개로 구성하였다.

그림 4는 여러 개의 LED를 직렬 연결하여 만든 서울반도체 AX3220의 전압-전류 측정곡선으로서 전류가 흐르기 시작하는 문턱전압은 대략 132 V이고, 220 V에서는 20 mA의 전류가 흐름을 알 수 있다.

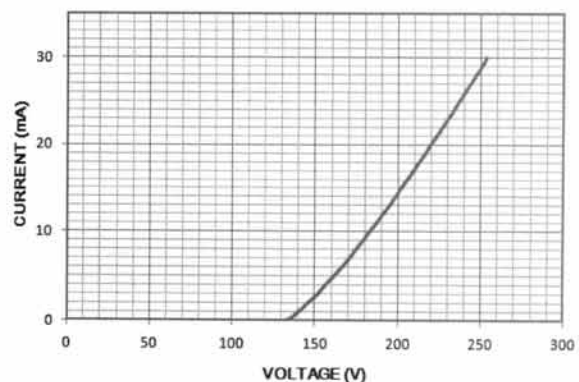


Fig. 4. Current-voltage curve of AX3220.

LED 블록개수에 따른 LED 램프의 전압-전류 관

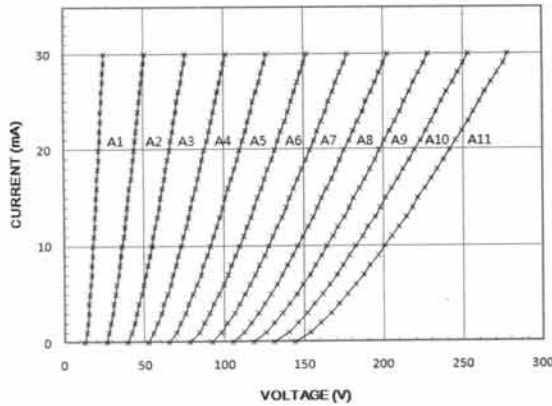


Fig. 5. Current-voltage curves of LED lamp as a function of number of LED block.

계를 모델링하기 위하여 LED 램프를 10개의 LED 블록으로 균등하게 나누고, 그림 4에 나타난 AX3220의 전압-전류 측정 결과로부터 전류가 0 mA에서 30 mA까지 1 mA 단위로 변할 때 그 전류에 해당하는 전압을 추출하였다. LED는 저항성 소자이기 때문에 다수 개를 직렬로 연결하면, 등가저항 (equivalent series resistance)은 직렬로 연결한 개수만큼 비례하여 증가한다. 즉, LED 블록 1개의 등가직렬저항이 LED 램프의 1/10이므로, 각 전류에 대한 LED 블록의 전압은 LED 램프의 1/10 값이 되며, LED 블록이 2개 직렬인 경우 각 전류에 대한 LED 블록의 전압은 LED 램프의 2/10 값이 된다. 따라서 LED 램프에서 전류가 30 mA 흐를 때 전압은 253.09 V이므로 LED 블록 1개의 전압은 25.31 V가 되고, 2개 직렬인 LED 블록들의 전압은 50.62 V가 된다. 이상과 같은 방법을 사용하여 얻은 LED 블록개수에 따른 LED 램프의 전압-전류 특성을 그림 5에 나타내었다.

A1은 LED 블록이 1개, A2는 LED 블록이 2개 직렬연결, ..., A11은 LED 블록이 11개 직렬연결일 때 각각 전류가 0 mA에서 30 mA까지 1 mA 단위로 변할 때 그 전류에 해당하는 전압을 나타내었다. 직렬로 연결된 LED 블록의 개수가 적을수록 전류는 더욱 가파르게 증가함을 알 수 있다. 또한, 입력전압 150 V에서는 6종류의 LED 블록 (A6~A11)을 구동 가능하므로, 몇 개의 LED 블록을 직렬로 연결하여 점등하느냐에 따라서 LED 전류량은 달라진다.

그림 6은 그림 5의 수평축을 직류전압에서 교류전압 220 V로 변환한 것이다.

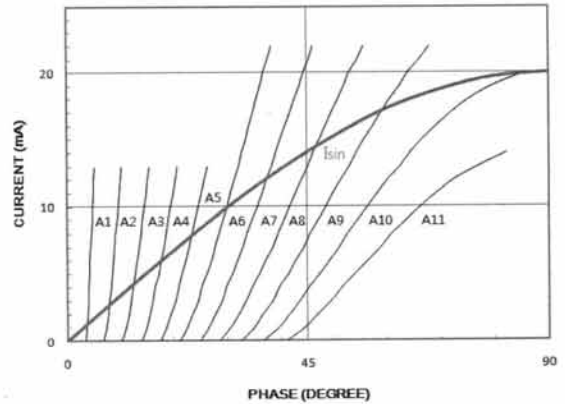


Fig. 6. Current of LED lamp as a function of phase of input voltage.

즉, A1은 LED 블록이 1개, A2는 LED 블록이 2개 직렬연결, ..., A11은 LED 블록이 11개 직렬연결일 때, 각각의 블록연결에 대하여 교류전압위상-LED 블록 전류를 나타내었다. 전압위상 (θ)은 식 (1)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$V_{in} = \sin(\theta) \times 220 \text{ V} \quad (1)$$

즉, 그림 6은 식 (1)에 교류전압위상을 대입하여 순시전압 V_{in} 을 구하고, 그림 4에 순시전압 V_{in} 을 대입하여 각각의 블록연결에 대한 전류를 구한 것이다. 그리고 그림 6에 나타난 설계전류 (I_{sin})는 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있다.

$$I_{sin} = \sin(\theta) \times 20 \text{ mA} \quad (2)$$

여기서, 설계전류는 각 전압위상에서 LED에 공급하고자 하는 부하전류이고, 부하전류를 \sin 함수로 함으로써 역율(power factor)이 개선된다.

그림 6에서 A1은 기울기가 거의 수직에 가깝다. 즉, LED 블록 1의 문턱전압 미만에서는 부하전류가 0이고, 문턱전압 이상에서는 설계전류가 부하에 흐른다고 가정하여도 실제로 전류오차는 미미하다. 정류전압 상승기에서 A6은 대략 10 mA에서 설계전류와 교차하며, 이때 전류원의 양단전압 (V_{cs})은 최소가 되므로 제어기는 스위치 블록을 제어하여 6개의 LED 블록들이 부하로서 작동하도록 한다. 즉, A1~A11 전류와 설계전류가 각각 교차하는 지점이 스위치 블록

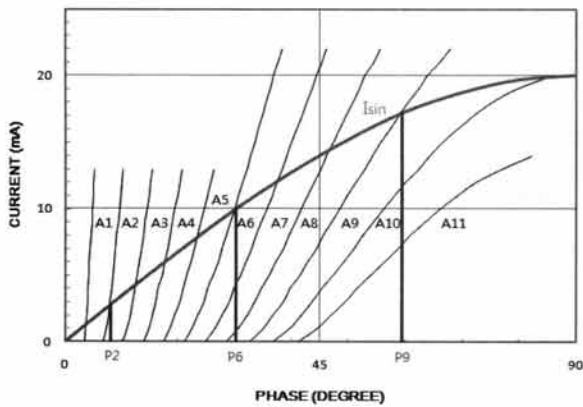


Fig. 7. Operation time of switches for changing a number of LED block.

을 제어하여 직렬 연결된 LED 블록개수를 변경하는 시점이다. 따라서 정류전압 상승기에서 A1~A11 전류와 설계전류가 각각 교차하는 지점에서 직렬 연결된 LED 블록개수를 변경하면 전류원의 양단전압은 최소(전류원 포화전압)가 되고, 다음의 A2~A11 전류와 설계전류가 교차하는 지점까지는 전류원의 양단전압은 증가한다. 직렬 연결된 LED 블록개수를 변경하는 스위치 회로의 동작시점을 그림 7에 나타내었다. 스위치 회로의 설정이 변경되어서 LED 블록 2개 (A2), 6개 (A6), 9개 (A9)를 점등하기 시작하는 시간은 각각 P2, P6, P9이다. 교류전압 위상에 따라서 순시 정류전압이 결정된다. 앞에서 언급한 P2, P6, P9 등의 시간들을 (기준)전압으로 변경하고, 순시 정류전압이 (기준)전압을 통과하여 상승하면 스위치 회로 설정을 변경하도록 제어기를 구성할 수 있다. 즉, 기준전압 발생회로, 비교기 및 간단 로직회로를 사용하여 직렬 연결된 LED 블록개수를 변경하는 스위치 제어회로를 구성할 수 있다. 정류전압위상 (θ)에 대한 순시정류전압 (V_{in}), 설계전류 (I_{sin}), 전류원의 양단전압 (V_{cs})을 표 1에 나타내었다.

표 1에서 정류전압위상 (θ)은 0° 에서 90° 까지 나타내었다. 순시정류전압 (V_{in})은 식 (1)에 의하여 계산할 수 있으며, 전압위상 0° 에서는 0 V이고, 전압위상 90° 에서는 220 V이다. 설계전류 (I_{sin})는 식 (2)에 의하여 전압위상 0° 에서는 0 mA이고, 전압위상 90° 에서는 20 mA이다. 그리고 전류원의 양단전압은 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다. 예를 들어 정류전압위상이 5° 일 때 식 (1)과 식 (2)에 의하여 순시정류전압은 19.2 V이고, 설계전류는 1.74 mA이다.

Table 1. V_{in} , I_{sin} , V_{cs} as a function of θ .

θ	V_{in} 220	I_{sin} 20	V_{cs}	θ	V_{in} 220	I_{sin} 20	V_{cs}
0	0.0	0.00	0.0	46	158.3	14.39	17.1
1	3.8	0.35	0.0	47	160.9	14.63	0.0
2	7.7	0.70	0.0	48	163.5	14.86	2.2
3	11.5	1.05	0.0	49	166.0	15.09	1.8
4	15.3	1.40	0.8	50	168.5	15.32	4.2
5	19.2	1.74	4.6	51	171.0	15.54	6.7
6	23.0	2.09	7.8	52	173.4	15.76	9.1
7	26.8	2.44	11.6	53	175.7	15.97	11.4
8	30.6	2.78	0.3	54	178.0	16.18	10.7
9	34.4	3.13	3.2	55	180.2	16.38	12.9
10	38.2	3.47	7.0	56	182.4	16.58	15.1
11	42.0	3.82	10.7	57	184.5	16.77	17.2
12	45.7	4.16	13.5	58	186.6	16.96	0.0
13	49.5	4.50	1.1	59	188.6	17.14	0.0
14	53.2	4.84	4.8	60	190.5	17.32	0.0
15	56.9	5.18	7.1	61	192.4	17.49	1.1
16	60.6	5.51	10.8	62	194.2	17.66	2.9
17	64.3	5.85	14.5	63	196.0	17.82	4.7
18	68.0	6.18	0.0	64	197.7	17.98	6.4
19	71.6	6.51	3.4	65	199.4	18.13	4.7
20	75.2	6.84	7.0	66	201.0	18.27	6.3
21	78.8	7.17	9.1	67	202.5	18.41	7.8
22	82.4	7.49	12.6	68	204.0	18.54	9.3
23	86.0	7.81	0.0	69	205.4	18.67	10.7
24	89.5	8.13	0.0	70	206.7	18.79	12.0
25	93.0	8.45	3.5	71	208.0	18.91	13.3
26	96.4	8.77	7.0	72	209.2	19.02	11.7
27	99.9	9.08	8.5	73	210.4	19.13	12.9
28	103.3	9.39	11.9	74	211.5	19.23	14.0
29	106.7	9.70	15.3	75	212.5	19.32	15.0
30	110.0	10.00	0.4	76	213.5	19.41	16.0
31	113.3	10.30	1.2	77	214.4	19.49	16.9
32	116.6	10.60	4.5	78	215.2	19.56	17.7
33	119.8	10.89	7.7	79	216.0	19.63	18.5
34	123.0	11.18	8.7	80	216.7	19.70	0.0
35	126.2	11.47	11.8	81	217.3	19.75	0.0
36	129.3	11.76	15.0	82	217.9	19.81	0.0
37	132.4	12.04	15.6	83	218.4	19.85	0.0
38	135.4	12.31	0.0	84	218.8	19.89	0.0
39	138.5	12.59	2.2	85	219.2	19.92	0.0
40	141.4	12.86	5.1	86	219.5	19.95	0.0
41	144.3	13.12	5.6	87	219.7	19.97	0.3
42	147.2	13.38	8.5	88	219.9	19.99	0.4
43	150.0	13.64	11.3	89	220.0	20.00	0.5
44	152.8	13.89	14.1	90	220.0	20.00	0.6
45	155.6	14.14	14.5				

LED 블록개수에 따른 각각의 전류가 0 mA에서 30 mA까지 1 mA 단위로 변할 때 그 전류에 해당하는 전압을 그림 5에서 확인할 수 있는데 설계전류 1.74 mA에 해당하는 전압이 없기 때문에 확인할 수가 없다. 따라서 1.74 mA의 전류보다 높은 2.0 mA를 선택하여 A1과 A2에서 그 전류값에 상응하는 전압이 각각 14.58 V와 29.16 V임을 확인할 수 있다. 순시정류전압 19.2 V는 LED 블록 1개를 구동하여 1.74 mA의 설계전류를 공급할 수 있으므로, 설계전류를 공급하는데 필요한 전압 이외의 잉여전압이 전류원의 양단에 걸리도록 하면 된다. 따라서 전류원의 양단전압은 19.2 V에서 14.58 V를 제외하면 4.62 V가 된다. 그러나 A2에서 설계전류 1.74 mA가 29.16 V에서 공급되므로 정류전압 위상 5° 에서 제공되는 순시정류전압 19.2 V로는 2개 직렬 연결된 LED 블록을 구동할 수 없다. 따라서 전류원의 양단전압은 각 전압위상에서 구동할 수 있는 최대 LED 블록개수를 구하고, 설계전류에서 순시정류전압과 LED 블록개수에 따른 전압의 차이를 계산하여 구할 수 있다.

이상과 같이 기존의 LED 조명장치에서는 제어기가 필요로 하는 전류가 1 mA라고 가정하였지만 전압위상 69°에서 79° 사이에 공급된 전류만 재활용하여도 약 2 mA의 전류가 제어기에 제공될 수 있다. 이것은 기존의 LED 조명장치를 사용하면 저항 (R9)에서 400 mW ($200\text{ V} \times 2\text{ mA}$)의 전력이 소비되지만, 제안된 LED 조명장치에서 부하 전류를 재활용하면 시동회로에서 소비되던 전력 400 mW를 절감할 수 있다는 것을 의미한다. 동일한 방법으로 전압위상 0°에서 90°까지 전류원 양단전압이 10 V 이상인 것을 전부 재사용하면 약 5 mA를 재사용할 수 있고, 이것은 최대 약 1 W를 절감할 수 있음을 의미한다. 일반화하여 표현하면 순시전류 최댓값의 약 1/4에 해당하는 평균전류를 재사용할 수 있다. (계산 예, 최대 순시전류 = 10이면, LED 전류 = $7.07\text{ A}_{\text{rms}}$ 이고, 재사용 가능한 전류 = $2.5\text{ A}_{\text{rms}}$ 이다. 기존기술로 9.57 W ($7.07+2.5$) LED 램프를 구동할 때, 제안 기술로는 7.07 W로 구동 가능하다. 이때 전력절감은 약 26% ($2.5/9.57$)이다. 효율개선은 SPICE 시뮬레이션으로 확인되었다. 시제품은 범용 소자 (TTL, OP-AMP)를 사용하여 제작하였다. 구동회로의 소비전류는 약 80 mA로 측정되었으며, LED 구동전류는 20 mA로, 재사용 전류만으로는 구동회로 동작이 불가능하였다. 구동회로의 동작원리와 역율 개선은 파형으로 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서 제안한 LED 조명은 빛을 방출하는데 사용한 전류를 제어기를 구동하는데 재사용할 수 있기 때문에 제어기 구동전압을 발생하는데 필요한 전력소모를 줄일 수 있다.

구체적으로는 순시전류 최댓값의 약 1/4에 해당하는 평균전류를 재사용할 수 있다. 따라서 백열등 대체용과 같은 저전력 LED 램프에서 소비전력을 최대 약 26%까지 절감할 수 있다. 또한, LED 램프에 흐르는 전류를 제한하는 전류원의 양단전압을 낮추어, 전류원의 소비전력을 낮춤으로써 전류원에서의 열 발생을 억제하여 전원장치의 신뢰성을 높이는 효과가 있다. 앞으로 전류원, 시동회로, 재활용 충전회로 등을 1개의 칩으로 집적시킨 custom IC를 제작하여 LED 구동회로의 동작뿐만 아니라 이론적인 효율과 실제 효율을 확인하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 경남과학기술대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] A. Borbély, A. Sáamson, and J. Schanda, *Color Research & Application*, 26, 450 (2001).
- [2] H. J. Chiu, H. M. Huang, H. T. Yang, and S. J. Cheng, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 32, 205 (2008).
- [3] B. H. Jeong, N. O. Kim, D. G. Kim, G. G. Oh, G. B. Cho, and K. Y. Lee, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 23, 23 (2009).
- [4] B. C. Kim, E. S. Jeon, and C. Kim, *Engineering and Technology (S-CET)* (Spring Congress on, 2012) p. 1.
- [5] J. Cho, J. Jung, J. H. Chae, H. Kim, J. W. Lee, S. Yoon, C. Sone, T. Jang, Y. Park, and E. Yoon, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, L1194 (2007).