

단독운전방지를 위한 능동적 주파수 변환기법의 출력전력 분석

이기옥*, 최주엽*, 최 익**, 유권종***, 안진웅****

*광운대학교 전기공학과(skalrl@kier.re.com), **광운대학교 정보제어공학과,
한국에너지기술연구원 태양광발전연구센터, *대구경북과학기술원

Output Power Analysis of Active Frequency Drift Method for Anti-Islanding

Lee, Ki-Ok* Choi, Ju-Yeop* Choy, Ick** Yu, Gwon-Jong*** An, Jin-ung****

*Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(skalrl@nate.com),
**Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon University,
Korea Institute of Energy Research, *Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

Abstract

Recently, as the grid-connected photovoltaic power conditioning systems (PVPCS) are installed in many residential areas, these have raised potential problems of network protection on electrical power system. One of the numerous problems is an Islanding phenomenon. In this paper, active frequency drift (AFD) method, one of the anti-islanding methods which is analyzed by current magnitude compensation and calculation of RMS value of the output power is proposed and verified by simulation.

Keywords : 태양광 전력변환기(PVPCS), 능동적 주파수 변동기법(active frequency drift method, AFD), 단독운전방지기법(Anti-Islanding Method)

기 호 설 명

cf : chopping fraction of AFD
 THD : 고조파 왜형을
 T_{Vutil} : 계통전압의 한주기 시간
 $T_{I_{pv}}$: 출력전류의 유효 시간
 t_z : 계통전압의 반주기 동안 전류가 0이 되는 시간

1. 서 론

본 논문에서는 분산전원용 계통연계형 인버터에서 주로 사용되는 능동적 단독운전 검출 기법 중의 하나인 능동적 주파수 변동기법(active frequency drift method : 이하 AFD 기법)에 대하여 chopping fraction(이하 cf)에 의한 출력전력을 수학적 모델링을 통하여

접수일자 : 2009년 10월 13일, 심사완료일자 : 2009년 10월 25일, 게재확정일자 : 2009년 12월 18일
교신저자 : 이기옥(skalrl@kier.re.kr)

분석하고, 그 결과를 PSIM에서 제공되는 전력 분석 블록을 이용하여 비교 및 검증함으로써, AFD 기법의 cf 에 의한 출력전력을 분석하고자 한다.

2. AFD 기법

능동적 주파수 변환기법의 대표적인 AFD 기법은 전력변환기가 출력전류의 주파수를 그림 1과 같이 계통전압의 주파수보다 빠르게 또는 느리게 제어하는 기법이다^[1]. 전력변환기가 계통으로 주입하는 전류의 주파수가 계통전압 주파수보다 빠르거나 느린 정도를 계통전압의 반주기 동안 출력전류가 “0”이 되는 시간의 비율인 cf 으로 나타낼 수 있고, 이는 식 (1)로 정의된다.

$$cf = \frac{T - T'}{T} \quad (1)$$

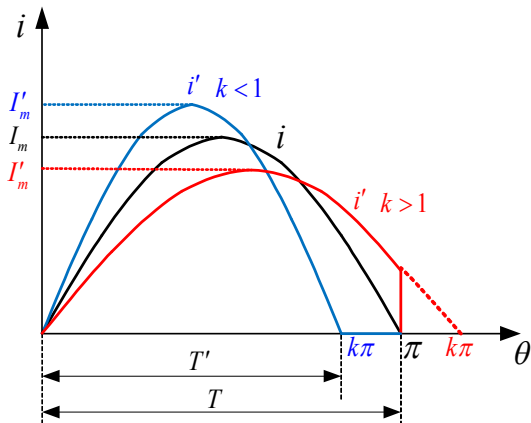


그림 1. AFD 기법의 출력전류 반주기 파형

계산의 편의를 위한 정의식 k 는 식(2)이고, cf 가 0일 경우의 출력전류 식은 식(3), cf 가 0이 아닐 경우의 출력전류는 식(4)와 같다. 또한, cf 가 0일 경우의 평균 전력은 식(5)와 같다. 모든 모델링은 식 (5)와 같이 cf 가 0 일 경우의 전력과 cf 가 0이 아닐 경우

의 전력이 같다고 가정하여, cf 가 양이거나 음일 각각의 경우에 대하여 식 (4)의 첨두값 (I'_m)을 계산하였다.

$$k = 1 - cf = \frac{T'}{T} \quad (2)$$

$$i = I_m \sin \theta \quad (3)$$

$$i' = I'_m \sin \frac{\theta}{k} \quad (4)$$

$$P_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} ((V_m \sin \theta)(I_m \sin \theta)) d\theta \quad (5)$$

2.1. cf 가 +(양)인 경우 역률 및 무효전력
 cf 의 크기가 $0 < cf < 1$ 인 경우, k 는 식 (3)에 의하여 cf 와 같은 범위인 $0 < k < 1$ 이 된다. 이 때 평균출력 전력은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$P_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{k\pi} ((V_m \sin \theta)(I'_m \sin \frac{\theta}{k})) d\theta \quad (6)$$

cf 가 0일 경우의 출력전력 식 (5)와 cf 가 양의 값일 경우의 출력전력 식 (6)을 동일하다는 가정에 의하여, 식 (7), 식 (8)과 같이 출력전류의 첨두값(I'_m)과 k' 가 계산된다.

$$I'_m = \frac{\pi(1 - k^2)}{2k \cdot \sin(k\pi)} I_m = k' I_m \quad (7)$$

$$k' = \frac{\pi(1 - k^2)}{2k \cdot \sin(k\pi)} \quad (8)$$

그러므로, 식 (7)을 식 (4)에 대입하여 cf 가 양일 경우 출력전류는 식 (9)로 정리된다.

$$i' = \frac{\pi(1 - k^2)}{2k \sin(k\pi)} I_m \sin\left(\frac{\theta}{k}\right) \quad (9)$$

식 (9)의 출력전류 식을 식 (10)의 실효값을 구하기 위한 정의에 대입하면, 식 (11)과 같이 출력전류의 실효값은 cf 가 양일 경우,

cf에 의한 함수로 정리된다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi i^2 d\theta} \quad (10)$$

$$i'_{rms} = \sqrt{\frac{k}{2}} k' I_m = \frac{\pi(1-k^2)}{2\sqrt{2k} \sin(k\pi)} I_m \quad (11)$$

식 (12)와 같은 역률의 정의식에 식 (11)을 대입하여 정리하면, 식 (13)과 같이 cf에 의한 역률을 계산할 수가 있다.

$$PF = \frac{P}{S_{cf+}} = \frac{V_m I_m}{v_{rms} i'_{rms}} \quad (12)$$

$$PF_{cf+} = \frac{2\sqrt{k} \sin(k\pi)}{\pi(1-k^2)} \quad (13)$$

또한, 피상전력(S_{cf+})은 식 (14)와 같이 계산되고, 이를 식 (15)에 대입하면, cf에 의하여 발생하는 무효전력을 계산할 수 있다.

$$S_{cf+} = \frac{P}{PF} = \frac{\pi(1-k^2)}{2\sqrt{k} \sin(k\pi)} P \quad (14)$$

$$Q_{cf+} = \sqrt{S_{cf+}^2 - P^2} = S_{cf+} \sqrt{1 - PF^2} \quad (15)$$

2.2. cf가 -(음)인 경우 역률 및 무효전력

cf의 크기가 $-1 < cf < 0$ 인 경우, k는 식 (2)에 의하여 $1 < k < 2$ 이 되고, 이 때 평균 전력은 식 (6)과 비교하여 적분의 범위가 $0 \sim k\pi$ 가 아니라 $0 \sim \pi$ 로 식(16)과 같이 계산된다.

$$P_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left((V_m \sin \theta) \left(I'_m \sin \left(\frac{\theta}{k} \right) \right) \right) d\theta \quad (16)$$

cf가 0일 경우의 출력전력 식 (5)와 cf가 음의 값일 경우의 출력전력 식 (16)을 등식으로 하여, 식 (17), 식 (18)과 같이 출력전류의 첨두값(I'_m)과 k를 계산할 수 있다.

$$I'_m = \frac{\pi(k^2-1)}{2k^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} I_m = k' I_m \quad (17)$$

$$k' = \frac{\pi(k^2-1)}{2k^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} \quad (18)$$

그러므로, 식 (17)을 식 (4)에 대입하여 cf가 음일 경우 출력전류는 식 (19)로 정리된다.

$$i' = \frac{\pi(k^2-1)}{2k^2 \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} I_m \sin\left(\frac{\theta}{k}\right) \quad (19)$$

식 (19)의 출력전류 식을 식 (10)의 실효값 정의식에 대입하면, 식 (20)과 같이 cf가 음일 경우의 출력전류 실효값은 cf에 의한 함수로 정리된다.

$$i'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{k}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{k}\right)} \frac{\pi(k^2-1)}{2k^2 \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} I_m \quad (20)$$

식 (12)의 역률 정의식에 식 (20)을 대입하여 정리하면, 식 (21)과 같이 cf에 의한 역률을 계산할 수가 있다.

$$PF_{cf-} = \frac{\sqrt{2} k^2 \sin\left(\frac{k}{\pi}\right)}{\pi(k^2-1) \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{k}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{k}\right)}} \quad (21)$$

또한, 피상전력(S_{cf-})은 식 (22)와 같이 계산되고, 이를 식 (23)을 대입하면 cf에 의하여 발생하는 무효전력을 계산할 수 있다.

$$S_{cf-} = \frac{\pi(k^2-1) \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{k}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{k}\right)}}{\sqrt{2} k^2 \sin\left(\frac{k}{\pi}\right)} P \quad (22)$$

$$Q_{cf-} = S_{cf-} \sqrt{1 - PF^2} \quad (23)$$

2.3. 계산 결과

표 1. cf 가 +(양) : 역률 및 전력 계산 결과

cf	k	k'	PF	S	Q
0.5%	0.995	1.0026	1.0000	1.0000	0.0094
1.0%	0.990	1.0052	0.9998	1.0002	0.0188
1.5%	0.985	1.0080	0.9996	1.0004	0.0282
2.0%	0.980	1.0109	0.9993	1.0007	0.0377
2.5%	0.975	1.0139	0.9989	1.0011	0.0471
3.0%	0.970	1.0170	0.9984	1.0016	0.0566
3.5%	0.965	1.0202	0.9978	1.0022	0.0660
4.0%	0.960	1.0235	0.9972	1.0028	0.0755
4.5%	0.955	1.0270	0.9964	1.0036	0.0850
5.0%	0.950	1.0305	0.9956	1.0045	0.0945
6.0%	0.940	1.0381	0.9936	1.0064	0.1136
7.0%	0.930	1.0460	0.9913	1.0088	0.1327
8.0%	0.920	1.0545	0.9886	1.0115	0.1520
9.0%	0.910	1.0636	0.9856	1.0146	0.1714
10.0%	0.900	1.0731	0.9823	1.0181	0.1909
11.0%	0.890	1.0832	0.9786	1.0219	0.2105
12.0%	0.880	1.0939	0.9745	1.0262	0.2303
13.0%	0.870	1.1052	0.9701	1.0308	0.2503
14.0%	0.860	1.1171	0.9653	1.0359	0.2704
15.0%	0.850	1.1296	0.9602	1.0414	0.2908

표 2. cf 가 -(음) : 역률 및 전력 계산 결과

cf	k	k'	PF	S	Q
-0.5%	1.005	0.9976	1.0000	1.0000	0.0093
-1.0%	1.010	0.9952	0.9998	1.0002	0.0185
-1.5%	1.015	0.9930	0.9996	1.0004	0.0274
-2.0%	1.020	0.9908	0.9993	1.0007	0.0363
-2.5%	1.025	0.9888	0.9990	1.0010	0.0449
-3.0%	1.030	0.9868	0.9986	1.0014	0.0534
-3.5%	1.035	0.9849	0.9981	1.0019	0.0617
-4.0%	1.040	0.9832	0.9976	1.0024	0.0699
-4.5%	1.045	0.9815	0.9970	1.0030	0.0780
-5.0%	1.050	0.9798	0.9963	1.0037	0.0859
-6.0%	1.060	0.9768	0.9949	1.0051	0.1013
-7.0%	1.070	0.9741	0.9933	1.0067	0.1162
-8.0%	1.080	0.9717	0.9916	1.0085	0.1306
-9.0%	1.090	0.9696	0.9897	1.0104	0.1445
-10.0%	1.100	0.9676	0.9877	1.0124	0.1580
-11.0%	1.110	0.9660	0.9857	1.0145	0.1710
-12.0%	1.120	0.9645	0.9835	1.0167	0.1837
-13.0%	1.130	0.9633	0.9813	1.0190	0.1959
-14.0%	1.140	0.9623	0.9791	1.0214	0.2077
-15.0%	1.150	0.9615	0.9768	1.0238	0.2192

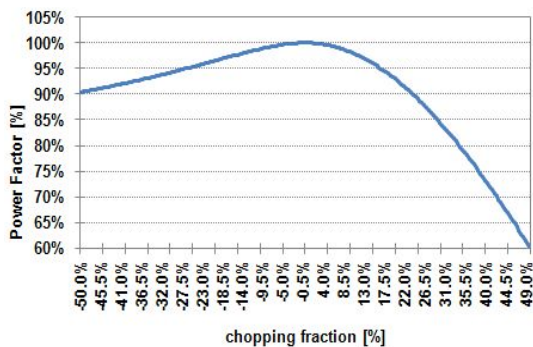


그림 2. cf 에 따른 역률(Power Factor)

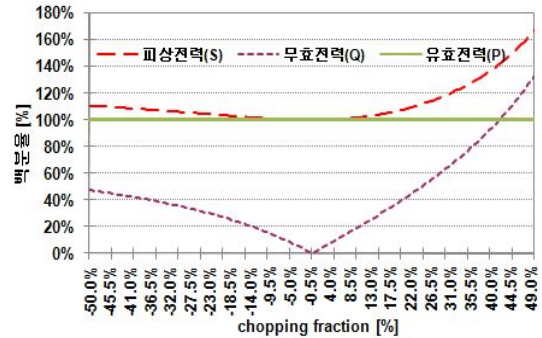


그림 3. cf 에 따른 피상전력, 무효전력

2.1장에서 유도된 결과를 근거로 표 1에 cf 가 양(+)일 경우의 역률, 피상전력, 무효전력량을 계산한 것이고, 표 2는 2.2장에서 유도된 식을 근거로 cf 가 음(-)일 경우의 결과이다. 또한, cf 에 따른 역률은 그림 2에 도시하였고, 그림 3에 cf 에 따른 피상전력, 무효전력 및 유효전력을 도시하였다.

3. 시뮬레이션

2장에서 모델링 및 계산된 결과를 검증하기 위해서 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1. 시뮬레이션 회로

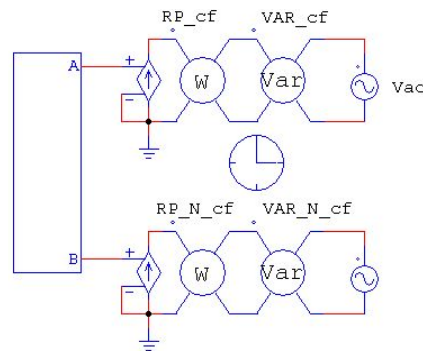


그림 4. THD를 계산하기 위한 PSIM 회로

그림 4는 cf 에 따른 AFD 기법의 출력전

류를 만들기 위해 사용한 블록 및 제공되는 계산 블록들이다.

cf 가 $\pm 5\%$ 일 경우의 위상(wt_deg_AFD)을 라디안 단위가 아닌 각도 단위로 나타내었고, cf 가 0일 경우의 위상(wt_2pi_deg)도 각도 단위로 나타내었다. cf 가 고려된 출력전류 파형 (I_{out_cf})과 cf 가 고려되지 않은 출력전류 파형 ($I_{out_N_cf}$)을 비교하여 도시하면 그림 5와 그림 6과 같다. 이 출력전류의 첨두값은 $220V_{rms}$, 60Hz의 상용계통에 연계되어 있는 3kW의 정격용량의 계통연계형 인버터를 가정하여 계산한 값으로 약 20A peak의 전류를 가정하였다.

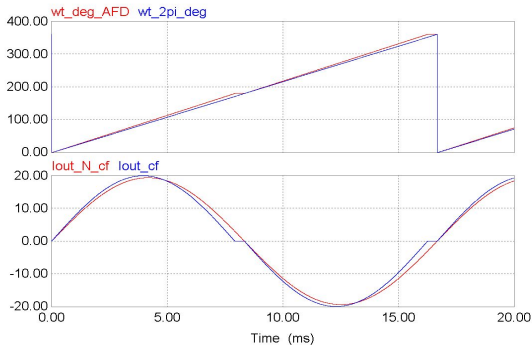


그림 5. $cf = 5\%$, 출력전류 파형과 위상

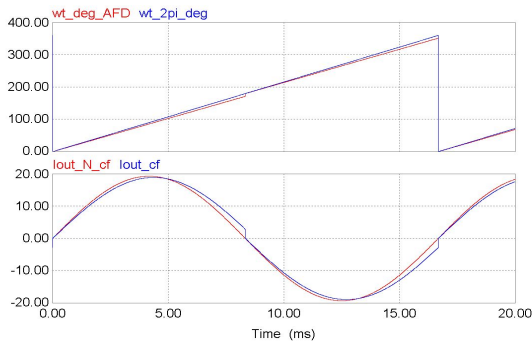


그림 6. $cf = -5\%$, 출력전류 파형과 위상

그림 5와 그림 6에서 보는 것과 같이 cf 의 부호에 따라 위상이 변화하고, 이에 따라 출력전류의 모양이 같이 변화되는 것을 관찰할 수가 있다.

3.2. 시뮬레이션 결과

cf 를 -10% 에서 $+10\%$ 까지 변화시켜서 얻은 출력전류의 역률, 피상전력, 무효전력은 표 3에 나타내었다.

표 3. PSIM에 의한 역률, 피상전력, 무효전력

cf	PF	S	Q	cf	PF	S	Q
-0.5%	1.0000	1.0000	0.0087	0.5%	1.0000	1.0000	0.0069
-1.0%	0.9999	1.0001	0.0164	1.0%	0.9999	1.0001	0.0148
-1.5%	0.9997	1.0003	0.0239	1.5%	0.9997	1.0003	0.0226
-2.0%	0.9995	1.0005	0.0313	2.0%	0.9995	1.0005	0.0305
-2.5%	0.9993	1.0007	0.0385	2.5%	0.9993	1.0007	0.0384
-3.0%	0.9990	1.0010	0.0456	3.0%	0.9989	1.0011	0.0462
-3.5%	0.9986	1.0014	0.0526	3.5%	0.9985	1.0015	0.0541
-4.0%	0.9982	1.0018	0.0595	4.0%	0.9981	1.0019	0.0620
-4.5%	0.9978	1.0022	0.0662	4.5%	0.9976	1.0024	0.0699
-5.0%	0.9974	1.0026	0.0728	5.0%	0.9970	1.0030	0.0778
-5.5%	0.9969	1.0031	0.0792	5.5%	0.9963	1.0037	0.0857
-6.0%	0.9964	1.0037	0.0856	6.0%	0.9956	1.0044	0.0936
-6.5%	0.9958	1.0042	0.0919	6.5%	0.9949	1.0051	0.1016
-7.0%	0.9952	1.0048	0.0980	7.0%	0.9941	1.0060	0.1095
-7.5%	0.9946	1.0054	0.1041	7.5%	0.9932	1.0069	0.1175
-8.0%	0.9940	1.0060	0.1100	8.0%	0.9922	1.0078	0.1254
-8.5%	0.9934	1.0067	0.1158	8.5%	0.9912	1.0089	0.1334
-9.0%	0.9927	1.0074	0.1216	9.0%	0.9901	1.0100	0.1415
-9.5%	0.9920	1.0081	0.1273	9.5%	0.9890	1.0111	0.1495
-10.0%	0.9913	1.0088	0.1328	10.0%	0.9878	1.0123	0.1575

표 3의 결과를 cf 에 의한 역률을 나타내면 그림 7과 같고, 피상전력과 무효전력은 그림 8과 같다. 모델링에 의해 도출된 계산과 시뮬레이션으로 계산된 결과를 비교해보면, 역률과 피상전력의 최대 오차는 0.57%이나, 무효전력은 평균 18%의 오차가 있는 것으로 나타났으나 이는 PSIM 시뮬레이션의 계산오차로 사료된다. 그러므로 수학적으로 계산된 방법은 기존 실험적으로 측정되었던 방법에 비하여 보다 정밀한 계산결과를 도출할 수 있다^[2].

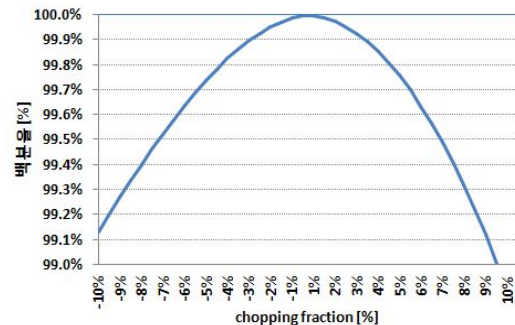


그림 7. cf 에 의한 PSIM: 역률

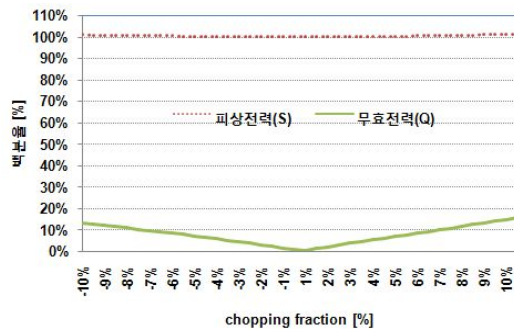


그림 8. *cf*에 의한 PSIM: 피상전력 및 무효전력

의 Anti-Islanding을 위한 RPV 방식 및 AFD 방식의 해석 및 설계,” 전력전자학회 논문지, 제 12권, 제 1호, pp.37-49, 2007

4. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 분산형 전원에 사용되는 단독운전검출 기법 중 능동적 주파수 변화기법에 대하여 chopping fraction에 따른 출력전력에 대하여 분석하였다. 기존 AFD 기법의 *cf*에 의한 발전전력량의 분석은 실험적 측정 방법이어서 미흡하였으나, 본 논문에서는 모델링에 의한 계산 결과로 *cf*에 의한 출력전력을 정밀하게 계산할 수 있었다. 그 결과 *cf*가 양일 경우와 음일 경우에 서로 기울기가 다르게 분포한다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2008학년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Ropp, M.E., Begovic, M., Rohatgi, A., " Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention," Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume: 14, Issue: 3, pp. 810-816, Sept. 1999
2. 김홍성 외, "IEEE 929-2000 단독운전 시험 조건하에서 단상 계통연계형 PV 시스템