

(上) 負荷電流, (下) 高調波電流

電力系統의 高調波對策

Harmonics in Power System

③

박종근

서울대학교 전기공학과

신건학 · 이원빈 · 강영석

한전 기술연구원

4.5 고조파 예측계산 프로그램

4.5.1 프로그램 내의 예측계산 수법

가. 고조파 분포계산

고조파 분포 예측계산을 위하여는 기본파 전압, 전류의 크기 및 위상을 구하여야 하는데, 모선 어드미턴스 행렬 (Y_{BUS} matrix)을 사용 Newton Raphson 법으로 풀면 기본파를 얻을 수 있다.

또한 계통내의 고조파전압은

$$\dot{V}_n = \dot{Y}_n^{-1} \dot{I}_n \quad (4.6)$$

으로 구해지고 이때 계통의 제 n 조파 어드미턴스 행렬 Y_n 은 다음과 같은 방법으로 구한다.

i) 기본파 계산에서 얻은 어드미턴스 행렬에 주파수 특성을 고려하여 새로운 어드미턴스 행렬을 작성한다.

ii) 상위 계통 및 부하 Modeling에서 얻은 Impedance의 주파수 특성을 고려한 값을 각각 i) 행렬의 대각요소에 첨가시킨다.

나. 고조파 발생원의 전류

1) 자동계산인 경우

○ 발생차수 : $n = pm \pm 1$

$m = 1, 2 \dots$

○ 발생량 : $I_n = I_1/n$

2) 자동계산이 아닌 경우

파형분석이나 측정에 의해 차수별로 입력한다. 물론 파형분석의 경우에는 FFT (Fast Fourier Transform) 프로그램을 이용, 계산된 결과가 자동입력된다.

3) 제어각, 중부각을 고려한 경우

$$U = -\alpha + \cos(\cos \alpha - \frac{6X_s I_a}{\pi E_{a0}}) \quad (4.7)$$

X_s : 1相當의 轉流 Reactance

E_{a0} : 무부하 무제어 직류전압 평균치

E_s : 전원상전압(실효치)

3상 Bridge 정류기의 경우 U 는 식 4.7과 같이 구해진다. 교류선로의 고조파전류와 실효치 I_1 에 대한 비 (I_n/I_1)를 중부각 U 에 대하여 제어

각 α 를 Parameter로 취하고 FFT 프로그램을 이용, 계산한 결과는 이미 2·2·3항에 Graph로 나타냈다.

다. 복수발생원

복수발생원이 계통에 접속되어 있을 때 여러 발생원으로부터 발생하는 전류를 Vector적으로 중첩시키기 위해서는 기본파 계산에서 얻은 기준위상에 발생원의 위상각을 더하면 된다. 이때 고조파 분포계산은 차수별로 반복되므로 그림 4·2에서와 같이 기준 노드에 대한 기본파의 위상차에 n 배를 한 값을 사용하며 식 4·8과 같이 나타낼 수 있다.

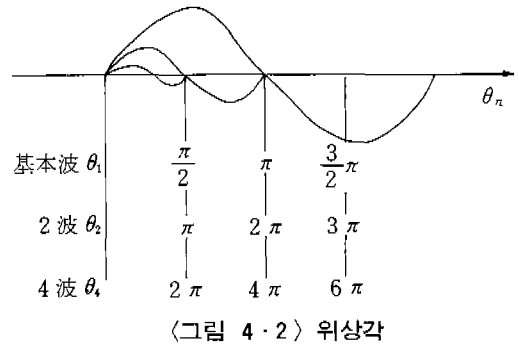
$$I_{nk} = |I_{nk}| \angle (n\theta_k + \varphi_k) \quad (4-8)$$

라. 多相변압기

고조파 발생원에 이상변압기가 연결되어 있어서 $+\theta$, $-\theta$ 만큼 위상 변화시킬 때 1차측의 합성전류는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_1 = 2\cos(n\theta) \cdot [a_n \sin(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (4-9)$$

$\theta \pm 15^\circ$ 일 경우 2차측 전류의 $\cos \frac{n\theta}{12}$ 배가 되어 고조파 성분은 많이 줄게 된다.



마. 임피던스 기초계산

1) 선로

$$R = R_0 \cdot l \cdot V_R \quad V_R : V_B / V$$

$$X_L = X_{0L} \cdot l \cdot V_R \quad V_B : \text{Base 전압}$$

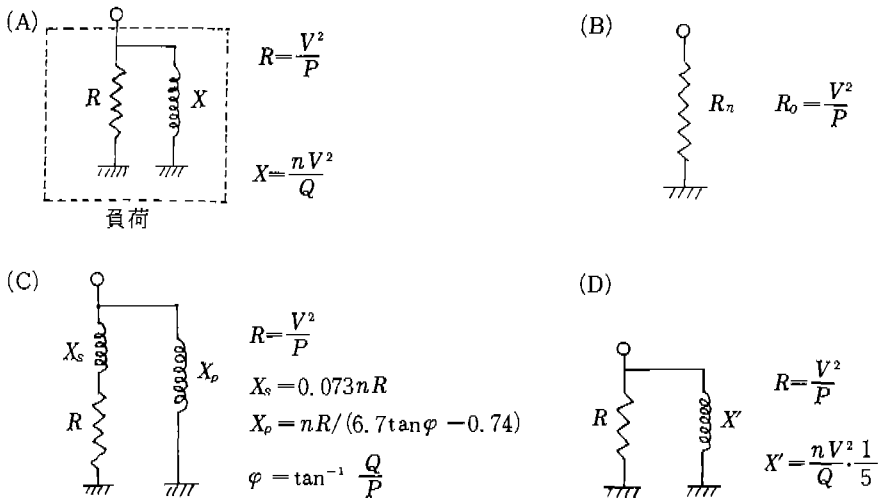
$$X_C = X_{0C} \cdot \frac{1}{l} \cdot V_R \quad V : \text{선로전압}$$

2) 변압기

$$Z_T = \frac{10 V_n^2}{S_n} (R + j\sqrt{Z^2 - R^2})$$

S_n : 변압기 용량 R : %저항강하
 Z : %임피던스 강하 V_n : Base 선간전압

3) 부하



〈그림 4·3〉

부하는 Modeling 방법에 따라서 Impedance가 달라지게 되는데, 그림 4·3과 같은 유형이 있다.

바. 응용계산

1) 종합왜율

$$V_{K D} = \sqrt{\sum_{n=2}^{49} V_{Kn}^2} / V_{K1} \times 100\% \quad (4 \cdot 10)$$

2) 콘덴서 과부하율

$$\sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{49} I_n^2} \quad (4 \cdot 11)$$

4·5·2 프로그램의 실제

가. 프로그램의 개요

서울대학교와 한전 기술연구원의 공동연구로 개발된 본 프로그램은 기본파계산과 고조파계산을 하는 아래와 같은 副 프로그램으로 구성되어 있다.

1) INBLH

입력 Data를 읽어들이는 프로그램

2) YBMH

기본파 조류계산을 위한 어드미턴스 행렬 (Bus Admittance Matrix)을 구하는 프로그램

3) PQKH

각 노드점에서의 전류와 전력을 구하는 프로그램

4) DELBH

조류계산 수검관정을 위한 전력의 증분량 계산 프로그램

5) RJMH

자코비안 행렬 (Jacobian Matrix)을 구하는 프로그램

6) FLESZ

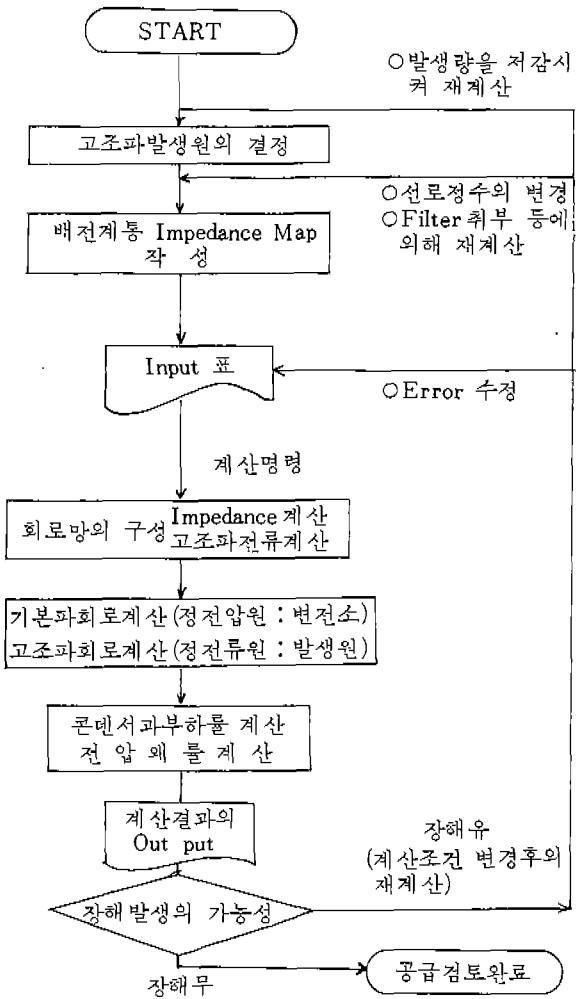
수정량 계산 프로그램

7) UPEFH

수정량으로 전압을 개선해 가는 프로그램

8) HACAL

고조파 계산을 하는 프로그램



(그림 A)

나. 예측계산 Flow (그림A)

다. 입력 Data

입력 Data는 OBus Data ONode Data OLine Data O고조파 발생원 Data로 구분된다.

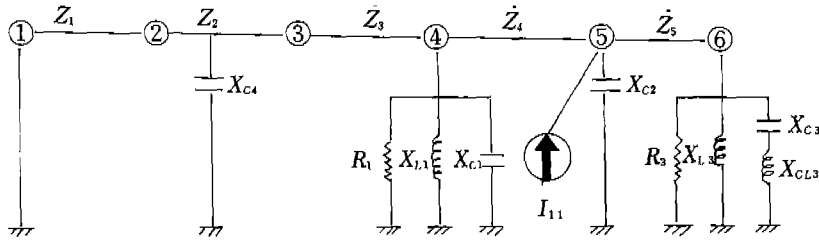
- Node Data의 예

OIBDE : 노드 번호

OIBT : 노드 형태

2 : 슬랙노드

6 : SC가 있는 노드



〈그림 4·4〉 계산에 사용된 모델계통

3 : 고조파 발생원 노드

0 : 부하가 있는 노드

4 : 부하가 없는 노드

○V_{VV} : 노드 전압

○PF : 부하역률

○QSR : 직렬 리액터 용량

○QLKVA : 부하 용량

○QSC : 콘덴서 용량

○ALPA : 부하율

라. 예측계산의 실례

그림 4·4와 같은 Model 계통을 이용, 예측계산을 실시한 결과를 표 4·1에 나타냈는데, 외국의 계산결과치와 거의 비슷하였고 계산상의 알고리즘도 정확한 것으로 판단되었다.

5. 고조파 억제용 Active Filter

5·1 개요

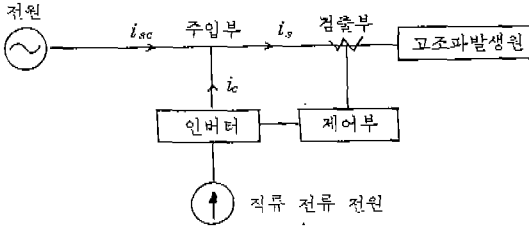
능동 필터로서 최근 주목받고 있는 방식이 전류형 인버터를 사용하는 전류 주입식 능동 필터이다. 이 능동 필터는 일정한 직류 전류원을 갖는 전류형 인버터를 이용하여 적절한 PWM 전류를 만들어 선로에 주입함으로써 고조파를 상쇄시키는 것이 기본원리이다. 이때 인버터의 제어부에서는 제어하고자 하는 고조파 전류에 따라 적절한 PWM 패턴을 결정하여 인버터를 구동하게 되는데, 이 PWM 패턴을 만드는 방식이 필터의 성능에 중요한 요건이 된다. 전력계통의

〈표 4·1〉 각 노드별 전압왜율 계산치

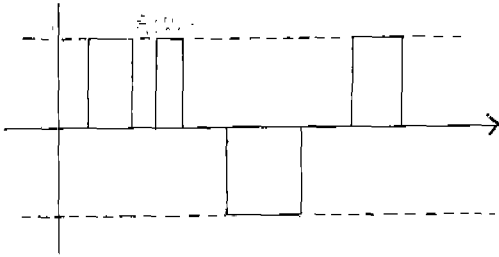
차수노드	1	2	3	4	5	6
11	-	0.2	0.3	0.8	3.5	2.9
	-	0.2	0.3	0.8	3.4	2.9
13	-	0.4	0.4	1.3	4.8	4.0
	-	0.3	0.4	1.2	4.5	3.9
23	-	0.3	0.3	1.1	1.8	1.5
	-	0.3	0.4	1.2	2.1	1.8
25	-	0.3	0.3	1.0	1.2	1.0
	-	0.3	0.4	1.1	1.3	1.1
35	-	0.1	0.1	0.3	0.9	0.7
	-	0.1	0.1	0.4	1.1	0.9
37	-	0.1	0.1	0.2	0.7	0.6
	-	0.1	0.1	0.3	0.8	0.7
47	-	-	-	-	0.4	0.3
	-	-	-	-	0.4	0.3
49	-	-	-	-	0.3	0.2
	-	-	-	-	0.4	0.3
종합왜율	-	0.6	0.7	2.2	6.4	5.4
	-	0.6	0.7	2.2	6.3	5.4

* 차수별 하단의 수치가 외국의 계산결과치임.

고조파 대책 연구과제 수행의 일환으로 개발된 본 Active Filter는 16bit 마이크로 프로세서로 구성하여 여러 PWM 제어방식의 적용이 가능하도록 하였고 인버터 직류전원은 별도의 전원을 사용하지 않고 Inductor를 사용하여 인버터가 기본파에 대해 정류기능을 수행함으로써 Inductor에 일정한 전류가 유지되도록 하였다.



〈그림 5·1〉 전류 주입식 능동 필터의 구성



〈그림 5·2〉 전류 주입식 능동 필터의 보상전류 예

5·2 고조파 억제원리

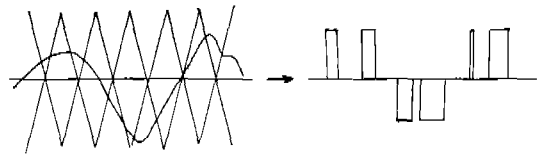
그림 5·1 과 같이 고조파 발생원이 계통에 연결되어 고조파 전류를 발생할 때 보상전류를 고조파 발생원의 입력단에 흘려 줌으로써 고조파를 상쇄시키는 것이다. 전원전류 i_s 를 Fourier 급수로 전개했을 때 고조파 전류 i_h 는

$$i_h(\omega t) = \sum_{n=2}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} b_n \cos(n\omega t) \quad (5.1)$$

이며, 이 고조파 전류가 제거되기 위한 보상전류 i_c 는

$$i_c(\omega t) = -i_h(\omega t) \quad (5.2)$$

의 관계로 주어진다. 식 5·2를 만족하는 필터를 보통 이상적인 필터라고 할 수 있는데, 이러한 이상적인 필터는 소전력일 경우에는 선로로부터 고조파를 검출하여 이를 증폭시켜 주입함으로써 실현이 가능하지만 대전력일 경우에는 기술상 거의 불가능하므로 다른 방법을 사용하여야 한다.



〈그림 5·3〉 삼각파 변조법

그림 5·1에서 전류형 인버터를 사용하는 전류 주입식 능동 필터는 기본적으로 일정 직류전류 전원과 전류형 인버터 및 그 제어부와 고조파 전류의 검출부로 구성된다. 이 방식은 검출부에서 검출된 고조파 전류의 정보를 바탕으로 일정 직류전류를 적절히 인버팅함으로써 보상전류를 만드는 방식이다.

따라서 보상전류는 그림 5·2와 같이 펄스폭 변조(PWM) 된 파형이 된다. 이러한 PWM 파형은 임의의 고조파 전류에 대하여 식 5·2를 만족시킬 수는 없으며, 문제는 어떠한 방법으로 PWM 보상전류를 만들어서 식 5·2의 관계를 잘 근사시키느냐 하는 것이라고 하겠다. 이 PWM 패턴을 만드는 방식은 필터의 성능에 중요한 영향을 미치는 것으로서 이제까지 여러가지의 방법들이 발표된 바 있다.

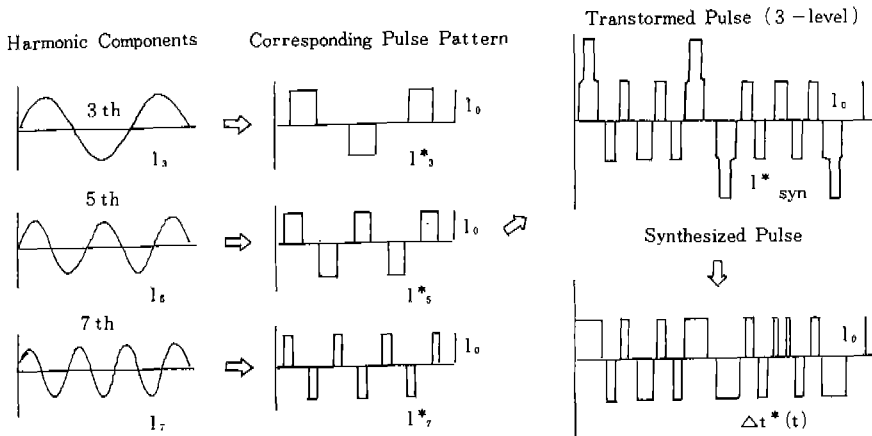
5·3 PWM 제어방법

5·3·1 삼각파 변조법

삼각파 변조법은 그림 5·3과 같이 고조파 파형과 삼각파 캐리어와의 교점으로부터 PWM을 구하는 방식이다. 이 방식은 제어부가 아날로그 회로로 구성될 수 있으며 또한 고조파의 변동에 대해서 실시간으로 대응한다는 장점이 있으나, 고조파의 제거율이 미흡하다는 단점을 가지고 있다.

5·3·2 멀티펄스 변조법

그림 5·4는 멀티펄스 변조법의 개념을 도식화한 것이다. 이 방법은 고조파 파형을 FFT를 통해 각 고조파의 Fourier 계수를 구한 다음 이

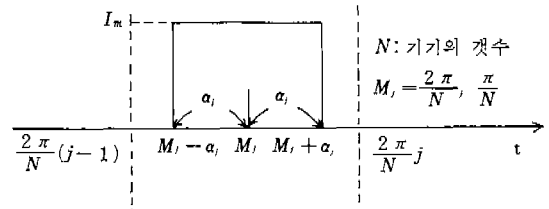


〈그림 5-4〉 멀티 펄스 변조법

계수들과 상응하는 펄스파를 만들어 중첩시킴으로써 합성파를 만든다. 이때 저주파수 펄스파가 발생하는 고조파들은 다음 단계 펄스파를 만들기 전에 본래 고조파의 Fourier 계수에 더해 줌으로써 합성파의 Fourier 계수가 본래의 고조파 Fourier 계수와 일치하도록 한다. 이 합성파는 다단계 PWM 파형이며 전류형 인버터로 만들어질 수 있는 3 단계 PWM 파형은 근사 등가변환을 거쳐서 만들어지는데, 이때에 약간의 오차가 발생하기 때문에 최종의 PWM 파형은 본래의 고조파를 완전히 제거하지 못한다. 이 방식은 제어부가 마이크로 프로세서에 의해 구성되어야 하며 마이크로 프로세서는 FFT 계산, 펄스의 구성 및 중첩, 그리고 근사 등가변환 등의 계산을 수행한다.

5.3.3 등거리 격자 고조파 제거법

한 주기를 N 개의 등거리 격자로 나누어 각 격자의 중점에 적당한 폭을 갖는 펄스들을 배치하는 것을 생각한다. 이때, 이렇게 구성된 펄스파의 Fourier 계수가 주어진 고조파 전류의 Fourier 계수와 낮은 차수부터 N 개가 같아지도록 각 격자의 펄스폭을 결정하는 것이 고조파 제거법의 기본 개념이다.

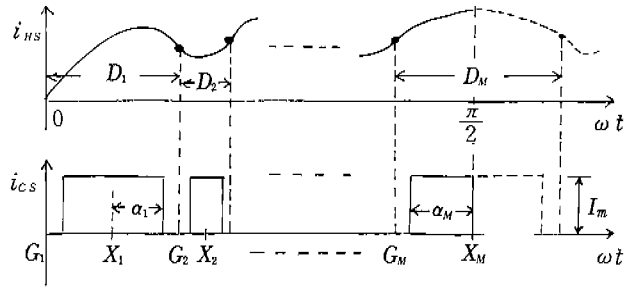


〈그림 5-5〉 등거리 격자 고조파 제거법 (j번째 격자에서의 미지수)

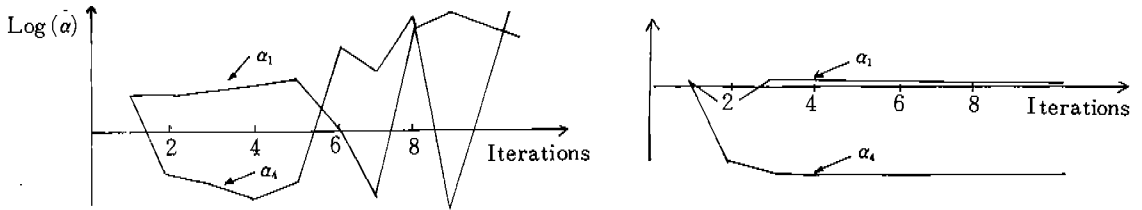
각 격자를 그림 5.5와 같이 표시하면 결정되어야 할 것은 N 개의 α 들이다. 등거리격자 고조파 제거법은 일정한 갯수의 저차 고조파들을 완전히 제거한다는 이점이 있으나 펄스폭의 계산에 비선형 연립방정식의 풀이가 필요하다는 단점을 가지고 있다.

5.3.4 적응격자 고조파 제거법

적응격자 고조파 제거법은 등거리격자 방식을 개선한 방식으로서 한 주기를 등거리로 나누지 않고 고조파 파형 에너지의 소멸에 적응시켜 나눈으로써 비선형 연립방정식의 수렴특성을 개선시키며 또한 직류 전류원의 용량을 상대적으로 낮춤으로써 하드웨어 제작성의 가격을 저감시킬 수 있다. 격자는 그림 5.6과 같이 변폭점 혹



〈그림 5·6〉 적응격자 고조파 제거법



(a) 등거리 격자 방식

(b) 적응 격자 방식

$$i_u = 0.3\sin(3\omega t) - 0.15\sin(5\omega t) + 0.05\sin(7\omega t)$$

〈그림 5·7〉 수렴특성의 비교

은 꼭지점을 기준으로 나눌 수 있고 그림 5·7 은 $I_m = 0.38$ 에서 임의의 고조파 i_h 에 관한 수렴 특성을 비교한 것이다.

5·3·4 Walsh 급수를 이용한 제어법

Sinusoid 대신 Walsh 급수를 사용하여 Walsh 함수의 입장에서 i_c 와 i_u 가 N 차까지의 고조파 성분인 것 같도록 한다. i_h 의 고조파 계수 b 는 s 를 그림 5·8과 같이 정의하였을 때

$$b = w \cdot s \quad (5.3)$$

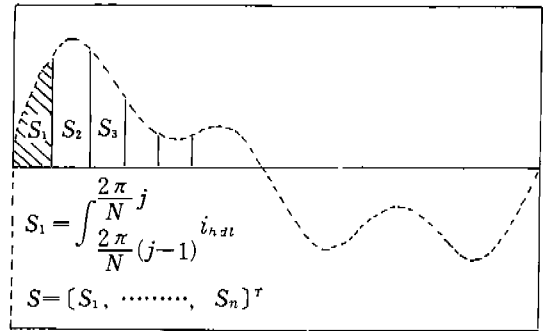
마찬가지로 i_c 의 고조파 계수 α 는

$$\alpha = w \cdot (2 I_m \alpha)$$

로 결정되고

$$\alpha = \frac{s}{2 I_m}$$

의 결과를 얻는다. 즉 그림 5·8과 같은 각 격자의 정적분값을 토대로 쉽게 α 를 결정할 수 있



〈그림 5·8〉 S의 정의

다. 이 결과는 FFT 및 비선형 연립방정식 풀이의 부담을 갖는 결과에 비해 계산량의 면에서 유리하다. Hard-ware의 구현을 통하여 부하변동에 의한 고조파 전류에 신속히 대응할 수 있는 장점이 기대된다. 〈다음호에 계속〉